



# Les représentations de la propagation du son, d'Aristote à l'Encyclopédie

François Baskevitch

## ► To cite this version:

François Baskevitch. Les représentations de la propagation du son, d'Aristote à l'Encyclopédie. domain\_other. Université de Nantes, 2008. Français. NNT: . tel-00423362

**HAL Id: tel-00423362**

**<https://theses.hal.science/tel-00423362>**

Submitted on 9 Oct 2009

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université de Nantes  
U.F.R. Lettres et Langages  
Ecole doctorale : « Connaissance, Langages, Cultures »

Année 2008

Numéro :

## Thèse

Pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Nantes  
en  
Histoire des Sciences et des Techniques

*Présentée et soutenue publiquement par*

**François BASKEVITCH**

\*

## **Les représentations de la propagation du son, d'Aristote à l'Encyclopédie**

\*

**20 octobre 2008**

\*

**Directeur de Thèse :**  
**Patrice BAILHACHE, professeur émérite, Université de Nantes**

### **Jury :**

M. Michel Blay, directeur de recherches CNRS, rapporteur  
M. Frédéric de Buzon, professeur, Strasbourg, rapporteur

M. Jean Rosmorduc, professeur honoraire, Brest  
M. François de Gandt, professeur, Lille  
M. Robert Muller, professeur, Nantes

*A ma mère,  
Qui m'a appris que la connaissance était bien plus que la richesse.*

*A mon père,  
Qui m'a donné la curiosité et le désir de comprendre.*

*A Martine,  
Qui m'a permis de revivre, de vivre et de poursuivre cette entreprise.*

*A Camille, A Benoît,  
Mes enfants, mes soleils.*

*A Patrice Bailhache, mon directeur de thèse,  
Qui a accepté de me faire confiance,  
Qui m'a soutenu, corrigé, et encouragé  
Tout au long de ces quatre années de travail.*

# Table des matières

<b>Avant-propos</b>	<b>9</b>
<b>1<sup>ère</sup> partie</b>	
<b>les origines - entre observation et dogme</b>	
<b>Introduction</b>	<b>12</b>
<b>1 - Le son est sensation</b>	<b>13</b>
<i>Les présocratiques</i>	<b>14</b>
Empédocle	14
Anaxagore, Clidème, Diogène	15
Archytas	16
Lasos d'Hermione	16
<i>Platon et Aristote</i>	<b>17</b>
Platon	17
Aristote	18
Les atomistes : Démocrite, Epicure, Lucrèce	19
<i>La tradition aristotélicienne au Moyen Âge</i>	<b>20</b>
<b>2 - Le son est nombre</b>	<b>22</b>
<i>La légende des marteaux de Pythagore : première représentation des intervalles musicaux par des nombres</i>	<b>22</b>
La version académique : Boèce	22
Le texte fondateur : Nicomaque de Gérase	24
Les trois expériences décrites par Nicomaque	26
Les autres textes	27
<i>Un contradicteur de Pythagore : Vincenzo Galilei</i>	<b>29</b>
<i>L'analyse des expériences</i>	<b>30</b>
Les nombres de Pythagore	32
La première expérience : les poids sonnants	32
La deuxième expérience : les poids tenseurs	34
La troisième expérience : le monocorde	35
<i>Les savants et les musiciens</i>	<b>39</b>
<i>Conclusion</i>	<b>40</b>
<b>Intermède - Variation sur les marteaux de Pythagore</b>	<b>41</b>
<b>3 - Le son est choc</b>	<b>49</b>
<i>Le bruit</i>	<b>49</b>
Archytas	49
Aristote, le chapitre 8 du livre II du Traité de l'Âme	49
Les péripatéticiens : les <i>Problemata</i> et le <i>De audibilibus</i>	52
<i>Les chocs sur l'air dans les instruments à vent et dans la voix</i>	<b>56</b>
<i>Les chocs sonores dans les textes de l'Antiquité tardive et du Moyen Âge</i>	<b>58</b>
<i>Le modèle 'percussif' de la propagation des sons</i>	<b>59</b>

<b>4 - Le son est mouvement</b>	<b>61</b>
<i>Le mouvement du son chez les Anciens</i>	<b>61</b>
Archytas	61
Platon	62
Aristote	63
Aristoxène	65
<i>Les péripatéticiens</i>	<b>66</b>
Les <i>Problemata</i> du Pseudo Aristote	66
La <i>division du canon</i> attribuée à Euclide	69
<i>Le mouvement du son après Aristote</i>	<b>69</b>
Le <i>De generatione sonorum</i> de Robert Grosseteste	70
<i>Conclusion : les mouvements associés au son</i>	<b>71</b>
<b>5 - Les sons sont des corpuscules ou des ondes</b>	<b>72</b>
<i>Les atomistes</i>	<b>72</b>
Démocrite et les débuts de l'atomisme	72
Epicure	72
Lucrèce	74
<i>Les stoïciens et l'ébauche de la théorie des ondes</i>	<b>76</b>
<b>6 - L'explication des phénomènes sonores de l'Antiquité Romaine au Moyen Âge</b>	<b>78</b>
<i>Le mythe de l'Harmonie des Sphères</i>	<b>78</b>
<i>Les phénomènes sonores 'paranormaux'</i>	<b>80</b>
La statue de Memnon	80
<i>Des solutions à quelques problèmes acoustiques</i>	<b>81</b>
La propagation du son le jour et la nuit	81
Le son du dehors et le son de l'intérieur	83
L'acoustique architecturale	84
Vitruve et l'acoustique des lieux scéniques	84
Le retard du son sur la vision	86
L'écho	87
<b>Conclusion - L'état de la connaissance du son vers la Renaissance</b>	<b>90</b>

## 2<sup>ème</sup> partie

### La physique des sons : Une science nouvelle

<b>Introduction</b>	<b>92</b>
<i>Les propriétés du son et leur observation</i>	92
<i>Les trois modélisations de la propagation des sons</i>	93
<b>1 - L'essence du son</b>	<b>94</b>
<i>La physique des sons chez les Scolastiques</i>	94
Le mouvement de la masse d'air « <i>unus et continuus</i> »	94
Les chocs successifs de parties d'air contiguës	95
<i>La physique des sons chez les arabes au X<sup>ème</sup> siècle</i>	96
Al-Farabi	96
Avicenne, Ibn Sina	97
Le son dans le commentaire au <i>De anima</i> d'Averroès	99
<i>La physique des sons à la fin de la Renaissance</i>	101
La physique des sons chez Suarez, Jésuite de tradition scolastique	102
L'approche des Franciscains	103
La physique mondaine de Scipion Dupleix	103
<i>De l'« Ecole », faisons table rase...</i>	105
Benedetti, un pionnier de l'opposition à Aristote	105
Francis Bacon, de « <i>Historia soni et auditus</i> » à « <i>Sylva sylvarum</i> »	106
Mersenne, un harmonisateur universel	110
<b>2 - Le temps du son : l'écho</b>	<b>113</b>
<i>Les deux approches de l'écho chez les Scolastiques</i>	114
Aristote et l'écho dans le <i>traité de l'âme</i>	114
La position médiane d'Alexandre d'Aphrodise	116
L'écho dans le Commentaire au Traité de l'âme d'Averroès	117
Le commentaire de Thomas d'Aquin	117
L'écho vu par un jésuite de la seconde tradition scolastique, Francisco Suarez	118
Résumé des théories scolastiques de l'écho	119
<i>L'approche expérimentale de l'écho aux débuts de la Science Moderne</i>	119
Les observations de Francis Bacon	120
La physique simple de Scipion Dupleix	123
Giuseppe Biancani dans <i>Echometria, idest Geometrica tractatio de Echo</i>	123
Mersenne et l'écho efficace	126
La phonocamptique de Kircher	133
Atomistes et cartésiens, la réflexion des corpuscules	134
Cartésiens sans Descartes	136
Les corps qui retiennent le son : Otto Von Guericke	138
L'écho produit par une cavité : Hautefeuille	139
<b>3 - Le temps du son : la vitesse du son</b>	<b>142</b>
Francis Bacon : le flambeau et la cloche	142
Mersenne : la durée et la distance d'une syllabe	143
Gassendi : la vitesse du son indépendante de la hauteur	148
Le canon de l'Academia del Cimento	149
Kircher : « <i>Semper diversam soni celeritatem invenimus</i> »	150

Les expériences de mesure à la <i>Royal Society</i>	151
Huygens chez les Perrault à Viry	151
Les mesures académiques parisiennes : Picard, Cassini, Roemer	152
Les observations sur le son de Joshua Walker	152
L'article de Derham, une synthèse des travaux du XVIIème siècle	153
Newton et le son	154
La détermination de la vitesse du son par le calcul, selon Newton	156
Le jeune Euler et la vitesse du son : une mystification ?	157
La mission de l'Académie des Sciences : Cassini 1738	159
La vitesse du son dans l'Encyclopédie	160
<b>4 - La matière du son</b>	<b>162</b>
<i>Le son est de nature corporelle</i>	<b>162</b>
Francis Bacon	162
Descartes	163
Mersenne	167
<b>Intermède – Galilée et la trace des vibrations</b>	<b>169</b>
La physique des sons, une préoccupation tardive chez Galilée	169
Des oscillations du pendule aux cordes vibrantes	170
Observer les vibrations : expériences dans un verre d'eau	170
Mesurer la hauteur du son en comptant les vibrations	171
Représenter les vibrations pour pouvoir les compter	172
Galilée et le 'nombre de vibrations dans le même temps'	172
<i>L'expérience de Galilée d'enregistrement des sons</i>	<b>173</b>
Récit de l'expérience d'enregistrement des vibrations	173
Analyse de l'expérience des traces du son	174
Les intuitions de Galilée, source d'erreurs et d'innovation	174
L'expérience de Galilée comme vérification de son hypothèse	175
L'apport de Galilée à la représentation des vibrations acoustiques	176
<i>Reproduction de l'expérience 'pré-phonographique' de Galilée</i>	<b>177</b>
Vérification des observations de Galilée	177
Images des traces de son laissées sur la plaque de cuivre	177
Analyse à l'aide du logiciel d'analyse spectrale	178
Analyse des courbes obtenues	182
Analyse des changements de fréquence brusques à la quinte	182
Conclusions de la reproduction de l'expérience	182
<b>5 - Le son est corpuscule</b>	<b>184</b>
<i>Isaac Beeckman</i>	<b>185</b>
<i>Gassendi : la réhabilitation de l'atomisme d'Epicure</i>	<b>187</b>
La physique des sons de Gassendi	188
La vitesse du son et la 'fréquence'	191
Autres questions relatives aux sons	193
<b>6 - Sons et rayons de lumière</b>	<b>197</b>
<i>L'analogie son et lumière au début du XVIIème siècle</i>	<b>197</b>
Beeckman	197
Mersenne	198
Francis Bacon	200
La physique des sons de Mersenne à Huygens	202

<b><i>Les Jésuites et les ‘rayons sonores’</i></b>	<b>202</b>
La réflexion des ‘rayons sonores’	204
Biancani (1566-1624) : les miroirs sonores	204
Bettini (1582-1657) : la focalisation des sons	205
Athanasius Kircher (1602-1680) : les rayons sonores	207
<b><i>Les Jésuites devenus Hommes de Science après 1660</i></b>	<b>210</b>
Francesco Maria Grimaldi (1618-1663)	210
Honoré Fabri (1607-1688)	211
Lana Terzi (1631-1687)	211
Les savants jésuites après Kircher : des ondes de son et de lumière	212
<b><i>L’analogie son et lumière à l’époque de Newton</i></b>	<b>212</b>
Narcissus Marsh : le microphone et le polyphone	212
Huygens : le son dans le <i>Traité de la lumière</i>	213
Newton et la propagation d’un mouvement de pression	214
L’analogie curieuse de Newton entre les couleurs et les tons	215
Conclusion	216
<b>7 - Les ronds dans l’eau</b>	<b>217</b>
<b><i>Introduction</i></b>	<b>217</b>
<b><i>Les origines de l’analogie des ronds dans l’eau</i></b>	<b>218</b>
Les Stoïciens	218
Vitruve : Le livre V du <i>De architectura</i>	218
Averroès : Le commentaire du <i>De Anima</i>	220
Les Scolastiques	221
Pertinence – ou non – de l’analogie des ronds dans l’eau	222
<b><i>L’analogie des ronds dans l’eau au XVII<sup>ème</sup> siècle</i></b>	<b>223</b>
Le silence de Francis Bacon dans <i>Sylva sylvarum</i>	223
Les réserves de Mersenne dans l’ <i>Harmonie universelle</i>	224
La curieuse adhésion de Gassendi au modèle	225
Galilée : l’expérience des ondes dans un verre d’eau	226
<b><i>Vers la théorie des ondes sonores : les jésuites Grimaldi, Pardies, Ango</i></b>	<b>229</b>
Grimaldi	229
Gaston Pardies et Pierre Ango	230
<b><i>La propagation du son à l’Académie Royale des Sciences</i></b>	<b>236</b>
Claude Perrault et le bruit	236
Huygens et les ondes	239
Newton et le tube en U	244
De la Hire : une expérience approximative corrigée par Dortous de Mairan	245
<b><i>Ondes, ondulations, oscillations et vibrations dans l’Encyclopédie</i></b>	<b>247</b>
<b><i>Conclusion : une métaphore bien pauvre mais qui se révèle enrichissante</i></b>	<b>247</b>
<b>Intermède - Les textes sur le porte-voix</b>	<b>249</b>
<b><i>Introduction</i></b>	<b>249</b>
Présentation du porte-voix	249
Présentation des textes sur le porte-voix	250
<b><i>Les théories de l’amplification des sons dans les porte-voix</i></b>	<b>251</b>
Kircher et la <i>Phonocamptique</i>	251
Samuel Morland	253
Jean-Baptiste Denis	255
Laurent Cassegrain	256
La réponse de Kircher	257



Hautefeuille	258
Christiaan Huygens	259
Claude Perrault	260
John Conyers	260
Narcissus Marsh (1638-1715)	261
Isaac Newton	261
Johann Christoph Sturm (1635-1703)	262
Willem Jacob s'Gravesande	263
Les Encyclopédistes	264
Jean-Henri Lambert	264
Conclusion provisoire	266
<b>8 - Le son et l'air</b>	<b>267</b>
<i>L'écho dans un air élastique</i>	267
<i>Claude Perrault et son 'agitation de l'air qui cause le bruit'</i>	268
<i>Huygens et les ondes</i>	268
<i>Newton et les vibrations dans les milieux élastiques</i>	271
<i>La propagation du son dans l'air condensé : Hauksbee, Brémond, Zanotti</i>	273
<i>L'air et le son dans l'Encyclopédie</i>	276
Un air bien silencieux	276
La physique du son et quelques physiciens du XVIIIème siècle	277
<i>Conclusion</i>	277
<b>9 - Synthèse</b>	<b>279</b>

## Avant-propos

Le sujet de cette recherche s'inscrivait, lors de sa conception, dans le domaine de l'Histoire des Techniques. En effet, une longue carrière dans les métiers de l'électro-acoustique m'avait conduit à aborder le sujet par cette voie. Le thème en était la compréhension des ressorts qui ont conduit à l'invention et au développement du phonographe, vers la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle.

Lorsqu'on étudie l'histoire d'un système technique, tel que celui de l'enregistrement sonore, il convient d'éviter la démarche anecdotique qui consiste à partir de notre époque et de remonter le temps en cherchant les étapes et les acteurs qui marquent le développement de l'invention. C'est malheureusement une démarche fréquente.

Il est rapidement apparu que le principe du phonographe, c'est à dire la gravure, dans le but d'une relecture, de la trace d'un son sous forme de la courbe de variation d'amplitude en fonction du temps, constituait le centre du système technique de l'enregistrement sonore. Comprendre les conditions de cette invention, c'était comprendre l'histoire de cette représentation du son, c'est-à-dire pourquoi à cette époque, et pourquoi cette courbe amplitude/temps plus que d'autres représentations ? En résumé, le paradigme du phonographe trouve son principe dans la représentation graphique du son.

En découvrant la problématique sous cet angle, on comprend que le but de nos inventeurs n'était pas de concevoir un appareil qui conserve la trace d'un son en vue de la reproduire, mais que, à l'inverse, c'est l'aboutissement de la représentation du son sous cette forme qui a produit une application parmi d'autres possibles, l'invention du phonographe. Rappelons ici que celle-ci est contemporaine de celle du téléphone et que leurs systèmes techniques sont très proches à cette époque, puisqu'ils s'inscrivent tous deux dans le cadre d'une évolution du système technique du télégraphe. Il est maintenant admis qu'Edison, en 1877, ne cherche pas à enregistrer des chansons, mais à trouver un procédé pour relayer les communications téléphoniques dont les lignes sont alors incapables de dépasser quelques kilomètres. Le phonographe d'Edison est en quelque sorte un répondeur-enregistreur téléphonique. Le téléphone, inventé par Graham Bell deux ans auparavant, procède quant à lui d'une nécessité de faire transiter plusieurs communications télégraphiques sur une même ligne, par un procédé de multiplexage fréquentiel. A la fin du texte de son brevet, Graham Bell suggère, parmi les applications possibles de son 'dispositif destiné à améliorer le télégraphe', la transmission des sons, et notamment de la voix, sur des lignes télégraphiques.

Le téléphone, comme le phonographe, trouve son principe dans la transmission d'un signal électrique ou mécanique, dont les variations sont analogues aux variations continues de la pression atmosphérique lors de la propagation d'un son. Nous trouvons le même principe dans le concept du téléphone que dans celui du phonographe : la représentation du son sous forme de la variation dans le temps d'une grandeur autour d'un point de repos. Il s'agit de ce qu'on peut appeler dès maintenant la représentation graphique du son.

Dès lors, cette étude s'inscrit maintenant dans le champ de l'Histoire des Sciences, puisque comprendre ce qui a conduit à cette représentation, c'est tenter de comprendre comment on a représenté le son dans les différentes époques de l'histoire du savoir.

Au départ inscrite dans une période couvrant l'époque Moderne, du début du XVII<sup>ème</sup> siècle à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, il est vite apparu que comprendre la révolution scientifique du XVII<sup>ème</sup> siècle en Europe nécessitait de comprendre l'histoire de la Science Antique, et l'histoire de sa transmission, en particulier à travers les pérégrinations des textes d'Aristote et de ses commentateurs.

La période d'exploration s'est donc élargie vers le passé, et il a fallu amputer de façon équivalente les périodes plus récentes. C'est pourquoi cette étude embrasse les siècles qui vont de l'Antiquité au début du Siècle des Lumières. Elle est ainsi composée de deux parties, elles-mêmes divisées en chapitres thématiques. La première partie couvre l'Antiquité et une partie du Moyen Age, la seconde, plus importante, concerne la Révolution Scientifique, de la fin de la Renaissance au début du XVIII<sup>ème</sup> siècle.

Il existe très peu d'études d'Histoire de l'Acoustique physique, et moins encore sur l'histoire des représentations du son. En revanche la littérature primaire est très abondante, en terme de nombre d'auteurs, mais parfois insignifiante quant au volume que chacun a consacré à la physique des sons. Il a donc fallu chercher, fouiller, débusquer les théories du son parmi de nombreuses autres théories sur des sujets fort divers. La physique des sons ne trouve pas de place dans le découpage des connaissances basé sur le *quadrivium*. Cette discipline se partage donc entre, d'une part l'étude de la perception, et d'autre part l'étude de la musique et du

partage de l'octave en intervalles, ce qui relève aujourd'hui de la Musicologie, et sur laquelle on a déjà beaucoup écrit. C'est pourquoi, dans cette étude, on n'aborde pratiquement pas la problématique des intervalles, des consonances, ou des tempéraments.

L'étude se concentre sur l'histoire des représentations du son, et donc principalement sur la propagation, sans approfondir la production du son, ni sa perception.

Trois 'intermèdes' ponctuent cet ouvrage, qui sont trois facettes de mon travail de recherches sur des sujets voisins, pas encore explorés complètement. Le premier, propose une spéculation et une interprétation inédite d'une expérience attribuée à Pythagore. Le second, qui a fait l'objet d'une publication dans la *Revue d'Histoire des Sciences*, analyse l'expérience de la trace d'un son, relatée par Galilée dans les *Discorsi*, et présente un rapport de la reproduction de cette expérience. Le troisième est l'ébauche d'une étude bibliographique sur l'histoire de l'amplification du son dans le porte-voix, étude qui n'a fait l'objet que de peu de travaux à ce jour. Ces trois exposés présentent trois des méthodes utilisées lors de mon travail de recherche : la spéculation et l'élaboration d'hypothèses suivies d'une évaluation théorique ; l'analyse d'une expérience et sa reproduction suivie de l'interprétation des résultats ; enfin la recherche bibliographique contextualisée, et les nombreuses traductions, encore partielles, de textes sur un sujet particulier.

Cette thèse s'inscrit dans une étude qui n'est pas achevée, elle constitue une ébauche. La plupart des textes cités ici devraient faire l'objet d'approfondissement, et souvent de traduction lorsqu'ils sont en latin. Pour poursuivre, il conviendra notamment de faire l'histoire des cordes vibrantes, l'histoire de la représentation graphique, et des machines acoustiques du XIXème siècle. Il faudra également traiter la période qui s'étend de 1750 au début du XXème siècle. Il serait souhaitable enfin d'approfondir ce sujet relevant presque de l'Histoire des techniques, l'histoire de l'amplification des sons, et en particulier l'histoire du porte-voix, très riche en informations sur l'appréhension de la propagation du son au cours des siècles.

Il ne faut donc pas s'étonner que la conclusion de ce travail soit provisoire, il constitue une première étape dans mon entreprise de compréhension du phénomène sonore par l'histoire de ses théories.

## 1ère partie

### **les origines - entre observation et dogme**

## Introduction

Lorsqu'on cherche les textes qui traitent de la nature physique du son, on est confronté à une première difficulté, c'est la faible place qui lui est accordée par les savants, de l'antiquité à la période moderne. Cette étude est bien souvent annexée à des domaines plus généraux, sans approfondir l'explication de la production et de la propagation des sons. Il s'agit d'une part de l'étude de la perception, et d'autre part de la théorie de la musique. Alors l'étude du son intervient souvent en introduction, ou dans une partie consacrée à la voix et aux instruments. Les auteurs développent plus ou moins le sujet, et parfois l'abordent incidemment, lors de la description de phénomènes naturels comme le tonnerre ou l'écho.

La grande difficulté avec les textes scientifiques de l'Antiquité est qu'ils ne sont pratiquement jamais de source primaire. Et, comme le dit justement Jean-Paul Dumont dans sa préface des *Présocratiques*, traduction de l'ouvrage de Diels, à propos des textes qui nous sont parvenus : « le salut d'une oeuvre est toujours lié à un jugement de valeur ou d'intérêt ». Du temps de Platon et d'Aristote, les pythagoriciens étaient lus, parce que leurs textes étaient disponibles. Au début de notre ère, et plus encore au Moyen Âge, les seuls textes encore lisibles étaient ceux qui avaient été préservés, parfois sous forme de fragments, pour leur valeur selon la pensée du moment, c'est-à-dire le platonisme et l'aristotélisme. Ce n'est pas tant le contenu qui pose problème que la structure de la pensée scientifique qui est en cause. Le modèle de division et de classification des connaissances reste à peu près le même d'Aristote au XVII<sup>e</sup> siècle, et il sera formalisé en *trivium* et *quadrivium* dès les premiers siècles. Or, dans ce système organisé de connaissances, l'étude physique des sons ne trouve pas sa place. On y trouve, largement, l'étude de la musique, envisagée comme une composante des mathématiques, dans un grand nombre d'ouvrages consacrés à l'harmonie. On peut également lire plusieurs traités des sensations ou de la perception, selon le modèle d'Aristote, qui font une place à l'ouïe, en général après l'étude de la vision, et avant celle de l'odorat. On trouve enfin quelques allusions aux sons lorsqu'on parle du tonnerre, des éclairs et de la foudre, un peu avant les tremblements de terre, et juste après l'étude de l'arc-en-ciel.

Il faut bien dire que les philosophes de la nature n'ont pas beaucoup brillé dans l'approfondissement de cette étude physique des sons, et pourtant ils en avaient toutes les possibilités. C'est ainsi qu'on ne trouve nulle part d'étude sur la vitesse de propagation du son, sauf quelques allusions sur le délai entre l'éclair et le tonnerre, ou encore sur l'écho. De même, alors que la nature vibratoire du mouvement des corps sonores est établie, on n'a aucune étude de ce type de mouvement, alors qu'il est observable et reproductible, même lorsqu'il n'est pas sonore comme le mouvement du pendule. On est capable d'échafauder des hypothèses d'une grande complexité pour le mouvement des astres, mais pas d'observer le déphasage de deux mouvements périodiques, ou simplement de compter les occurrences des 'pulsations'. Il est clair que le carcan de l'organisation immuable des connaissances fait obstacle à toute excursion en dehors des sujets imposés. Cependant nos savants tentent de décrire quelques aspects de la nature physique des sons, en particulier leur production, le grave et l'aigu, le mécanisme de la perception auditive, et les rapports entre le son et son milieu de propagation. Les terrains d'exploration sont principalement la voix, surtout chez les présocratiques, les instruments de musique à cordes et à vent, et quelques phénomènes naturels. La première exploration est la hauteur des sons, et sa mesure selon des échelles qu'on va inventer et complexifier peu à peu, tant son approche non linéaire est délicate. Puis, lorsqu'on pressent que le son est associé à un mouvement, mais sans savoir bien ce qui est mu, les philosophes s'intéressent à la matérialité du son. De même, la grande perplexité provoquée par la conservation des timbres sonores qui permet la transmission et le chevauchement de conversations à distance, stimule les esprits qui envisagent des images de sons, analogues aux images visuelles, et formées de 'grains de matière'. Enfin, la propagation du son est modélisée, on la suppose semblable à celle des ronds dans l'eau, après qu'on y a jeté une pierre. Cette dernière approche sera féconde et nous mènera doucement à la notion d'onde, prémisse du processus de vibration.

Néanmoins, de l'Antiquité au Moyen Âge, quelques intuitions se dégagent ici ou là, et le terrain semble préparé pour la grande entreprise d'observations et d'expérimentations qui sera féconde à l'époque moderne.

## 1 - Le son est sensation

Si l'on en croit les paléontologues et les anthropologues, l'audition chez l'être vivant remplit deux fonctions. L'une est liée à la protection, par l'alerte de phénomènes extérieurs potentiellement dangereux qui émettent des sons, l'autre, plus évoluée, à la communication, pas forcément structurée. Le son est d'abord un bruit, dans lequel l'intensité et la durée jouent un rôle plus important que la fréquence ou le timbre. Il semble que les premiers hommes aient pu construire leur langage par imitation de certains animaux. Les premières tentatives de création musicale ont sans doute eu pour origine l'imitation du chant des oiseaux, d'abord par la voix, ensuite au moyen des premiers instruments, en particulier à vent (cornes). Les découvertes paléontologiques nous enseignent que des hommes, il y a environ 20 000 ans, faisaient usage de flûtes et d'instruments à percussion divers.

On a peu de traces des préoccupations de la physiologie de l'audition dans les civilisations anciennes. Pourtant chez les Egyptiens, on attribuait à l'oreille un rôle qui dépassait sa fonction essentielle :

Le souffle de la vie entre dans l'oreille droite, le souffle de la mort entre dans l'oreille gauche<sup>1</sup>

Dans quelques papyrus Egyptiens concernant la médecine, on trouve des conseils d'hygiène de l'oreille ou plus rarement du traitement de la surdité ou de l'otite.

En Mésopotamie, on trouve également des traités de médecine akkadiens (environ 2200 av. J.-C.), qui prodiguent des conseils en cas d'écoulement des oreilles, ou d'apparition de bourdonnements ou de sifflements, qu'on attribuait généralement à la manifestation d'un démon, le Spectre.

Parmi les premiers textes qui forment le socle de la culture occidentale, on trouve, dans l'*Illiad*e et l'*Odyssée*, de nombreuses descriptions de l'univers sonore du temps d'Homère (IX<sup>e</sup> siècle av. J.-C.), selon Charles Mugler<sup>2</sup> :

Les voix se distinguent par l'intensité du son (*Illiad*e, V, 786; *Odyssée*, XIV, 492, etc.), par la hauteur (*Illiad*e, II, 222; XVIII, 70; *Odyssée*, XII, 183), et par le timbre (*Illiad*e, I, 604; *Odyssée*, V, 61; XII, 187). Les scènes de combat et de naufrage lui fournissent les occasions de décrire les conditions physiques de la naissance des sons: le choc d'armes métalliques, les vibrations de la corde de l'arc, le vol strident des flèches, le passage du vent et des courants d'air par les défilés. La construction des instruments de musique mentionnés par Homère, et connus en grande partie des civilisations du Proche-Orient, s'inspire de ces observations sur la production des sons. Le son est présenté comme une réalité qui se meut à travers l'espace (*Illiad*e, X, 137; *Odyssée*, XVII, 261), et comme une force capable d'ébranler des obstacles et de "frapper" les oreilles (*Illiad*e, X, 535; *Odyssée*, XVI, 373). Le poète connaît les phénomènes de l'écho (*Illiad*e, XVII, 263; *Odyssée*, XII, 240) et de la résonance (*Illiad*e, II, 333).

Aux débuts de l'Histoire de la science occidentale, les présocratiques, en particulier les pythagoriciens, ne s'intéressent aux sons que sous l'approche mathématique de l'échelle musicale, par l'étude des intervalles. Nous n'avons de cette période que des sources secondaires, et, à part quelques fragments de Lasos ou d'Archytas (V<sup>e</sup> siècle av. J.-C.), nous ne disposons pas de textes sur la nature physique des sons.

L'absence de textes qui nous sont parvenus des présocratiques est compensée, concernant l'étude de la perception et des sensations, par le traité de Théophraste, disciple et successeur d'Aristote vers le III<sup>e</sup> siècle av. J.-C., *De sensu*, où l'on trouve un exposé des théories de la sensation et en particulier de l'audition, chez de nombreux philosophes antérieurs (V<sup>e</sup> siècle av. J.-C.) comme Empédocle, Alcéméon, Anaxagore, Clidème, Diogène et Démocrite.

Philosophe avant tout inspiré par les mathématiques, Platon (IV<sup>e</sup> siècle av. J.-C.) a peu traité du son sous sa nature physique. Il nous a laissé quelques lignes sur la sensation auditive dans le *Timée*.

Véritable inspirateur de la science du Moyen Âge, Aristote (IV<sup>e</sup> siècle av. J.-C.) paraît incontournable lorsqu'on tente de faire une Histoire des phénomènes naturels. Dans les textes d'Aristote qui nous sont parvenus, soit directement en version grecque, soit par l'intermédiaire des savants arabes, soit encore dans les nombreux textes d'inspiration aristotélicienne mais dont les auteurs sont de nos jours qualifiés de Pseudo-Aristote, on traite peu le son. L'essentiel tient dans le chapitre 8 du second livre du traité *De*

<sup>1</sup> Papyrus Ebers, n°854, 1875, sans doute de la XVIII<sup>e</sup> dynastie, environ 1500 av. J.-C.

<sup>2</sup> Charles Mugler, La science hellène, Homère, in René Taton, Histoire générale des sciences, La science antique et médiévale, t 1, Paris, Puf, 1957, p 209.

l'âme, ainsi que dans deux traités qui lui ont longtemps été attribués mais qui sont l'œuvre de ses successeurs, les *Problemata*, et un *De audibilibus* consacré, en une dizaine de pages, à l'étude physique des sons.

Jusqu'à la fin de la Renaissance l'étude de la sensation auditive est très largement inspirée par ce chapitre du *Traité de l'âme*. Dans l'Encyclopédie on trouve encore, concernant l'ouïe, des descriptions de l'oreille qui font appel à la théorie aristotélicienne.

La littérature médicale de l'antiquité s'intéresse peu à la physiologie de l'oreille.

## Les présocratiques

Il existait une science de la nature avant Platon et Aristote, et bien que les traces qui nous restent, au sujet de l'ouïe, proviennent essentiellement de Théophraste, elles nous renseignent sur les approches qu'avaient les présocratiques de la perception sonore.

Dans le *De sensu*, Théophraste se livre à une étude historique des théories sur les sensations qui sont développées chez les philosophes qui ont précédé Platon. Il les regroupe, de ce point de vue, en deux tendances. D'une part ceux qui pensent que les sensations sont produites par le semblable, Parménide, Empédocle, et également Platon<sup>3</sup>.

Les raisons invoquées sont, d'une part, que, d'ordinaire, les choses se contemplent d'après leur similitude ; qu'il est en particulier inné à tous les êtres vivants de reconnaître ceux de leur espèce ; qu'enfin les corps sentis le sont grâce à leurs effluves et que le semblable se porte vers le semblable.

Les autres soutiennent que les sensations sont produites par les contraires, et que le semblable n'agit pas sur le semblable mais sur le contraire. Parmi eux, on trouve Héraclite et Anaxagore.

## Empédocle

Empédocle envisage la sensation comme une circulation d'effluves émises par les matières, qui viennent s'introduire dans les pores des organes sensoriels des êtres vivants. La parfaite adaptation, l'harmonie, entre ces effluves et les pores dont les dimensions sont adaptées, permet la discrimination entre les différentes sensations et les organes appropriés. Si les pores sont trop grands, ou trop petits, les effluves n'y pénètrent pas, et c'est ce qui permet aux oreilles d'entendre et aux yeux de voir. C'est ce qui explique également les altérations des sens, provoquées par un rétrécissement accidentel des pores. Pour la vue, les yeux sont composés d'eau et de feu, et c'est l'équilibre variable entre ces deux éléments qui prédispose la vision de jour ou de nuit, ainsi que le blanc et le noir. Concernant l'audition, le phénomène n'est pas clair. Voici, dans l'extrait de l'*Histoire de la Science Hellène* de Paul Tannery, le passage du *De sensu* de Théophraste concernant l'audition chez Empédocle<sup>4</sup> :

L'audition, d'après lui, est produite par les bruits du dehors qui mettent l'ouïe en mouvement et provoquent une résonance interne; car il y aurait comme un grelot battant en dedans et qu'il appelle 'os charnu'; l'air en mouvement frappe dessus et le fait résonner.

L'édition de Tannery provient de la traduction de Diels<sup>5</sup>. Empédocle fait sans doute allusion au tympan et aux osselets qui composent l'oreille moyenne, qu'on avait observés au cours de dissections. Le mécanisme de la sensation repose sur une symétrie entre les effluves venant de l'extérieur et une capacité à 'répondre' qui vient de l'organe. Pour l'audition, Empédocle suggère que l'organe de l'ouïe résonne en 'harmonie' avec le son perçu. C'est la fonction du 'grelot' (Dumont traduit par 'cloche') qui entre en résonance avec le son externe. Théophraste critique cette théorie de la sensation par 'le semblable vers le semblable' et l'harmonie qui devrait s'en dégager. En particulier pour l'audition, Théophraste relève avec justesse qu'Empédocle repousse le problème sans le résoudre<sup>6</sup>:

Quant à l'ouïe, quand il l'explique par des bruits internes, il est étrange qu'il croie le faire clairement, en imaginant ce bruit du dedans analogue à celui d'un grelot. Si c'est par ce grelot que nous entendons les bruits du dehors, comment entendons-nous sa résonance ?

Nous découvrons néanmoins ici, parallèlement aux travaux d'inspiration mathématiques des pythagoriciens sur le son envisagé uniquement d'un point de vue musical, une approche plus physiologique, et

<sup>3</sup> Théophraste, *Sur les sensations*, in Paul Tannery, *Pour une Histoire de la science hellène*, Paris, Gauthier Villars, 1930, p 348 et suiv.

<sup>4</sup> Théophraste, *id.*, p 351.

<sup>5</sup> Ce passage pose un problème pour le terme 'os charnu': le texte de Théophraste porte : σάρκινον ῥόζον, mais Diels a proposé ῥόγκον. Jean Paul Dumont préfère traduire par 'rameau de chair'.

<sup>6</sup> Théophraste, *id.* p 355.

malgré son imprécision, susceptible de faire progresser l'étude de l'audition. Cette théorie des effluves et des pores sera reprise par la suite par les atomistes (Leucippe et Démocrite).

Avec Alcméon, on introduit un 'élément' qui plus tard deviendra plein de sens, le 'vide'. En effet, pour Alcméon<sup>7</sup>,

Nous entendons grâce au vide qui existe dans les oreilles et qui résonne; de même on parle par un creux, et l'air fait contre-résonnance.

Voici le même passage de Théophraste dans la traduction de J.-P. Dumont<sup>8</sup>:

L'ouïe met en jeu les oreilles car elles contiennent du vide qui résonne (c'est-à-dire qu'il sonne creux). Et l'air répercute le son (rendu par le vide).

Cette idée du vide dans les oreilles aura une belle destinée, notamment grâce à Aristote. Ce vide n'est pas celui de Pascal, il s'agit d'un milieu 'intermédiaire' entre l'air, qui est un élément et donc matériel, et l'éther inaccessible ici-bas. D'autre part, nous observons ici une tentative d'attribuer un rôle à l'air dans la propagation du son.

Une autre version du même écrit d'Alcméon, transmise par Aetius<sup>9</sup>:

Pour Alcéméon, c'est grâce au vide qui occupe l'intérieur de l'oreille que nous entendons; c'est lui en effet qui vibre, quand le souffle pénètre en elle; car tout ce qui est creux résonne.

Le terme 'vibrer' semble être un effet de style du traducteur, il est anachronique. Enfin, sur le même passage, Aristote commente<sup>10</sup>:

L'oreille est la partie de la tête qui permet d'entendre, mais aucun souffle n'y pénètre; Alcéméon a tort en effet d'affirmer que les chèvres respirent par les oreilles.

Il faut sans doute interpréter l'allusion aux chèvres comme une petite raillerie envers un philosophe qu'Aristote tenait pour peu compétent. Cependant Aristote fait une remarque intéressante: en effet, si l'air pénètre dans l'oreille, il faut qu'il en ressorte, et c'est sans doute ce qu'il veut dire lorsqu'il évoque la respiration. Son disciple Théophraste sera plus évasif, comme on l'a vu plus haut.

## **Anaxagore, Clidème, Diogène**

Théophraste continue son historique des théories de la sensation. Anaxagore attribue la sensation aux contraires<sup>11</sup>:

Car l'altération semble provenir non pas des semblables, mais des contraires.

Anaxagore pense que la sensation absolue n'existe pas, mais que, par exemple, le chaud se définit par rapport au froid, et qu'il n'est pas ressenti lorsque le corps est lui-même chaud. De même pour les saveurs. Cette approche relativiste et dialectique est nouvelle dans l'histoire de la pensée, largement influencée par Héraclite, et elle n'est pas inintéressante. Cependant, concernant l'audition, il faut bien admettre qu'Anaxagore est plutôt imprécis<sup>12</sup>:

Le bruit va jusqu'à l'encéphale, car l'os environnant est creux et le bruit y pénètre.

Par ailleurs il développe une théorie sur la taille des animaux qui induit une meilleure perception lorsqu'ils sont grands, ce que réfute Théophraste.

Pour Diogène d'Apollonie, ce sont les mouvements de l'air extérieur qui se communiquent à l'air situé à l'intérieur des oreilles<sup>13</sup>:

Quant à l'audition, elle se produit lorsque l'air qui est dans les oreilles, après avoir été mû par un objet extérieur, parvient jusqu'au cerveau.

Diogène détaille la sensibilité différente de l'audition chez les animaux, et la compare à l'olfaction, en ramenant la perception à la présence d'air dans les organes. C'est ainsi que « l'oreille doit être droite et largement

<sup>7</sup> Théophraste, *id.* p. 357.

<sup>8</sup> Théophraste, *De sensu*, 25-26, in Jean Paul Dumont, *Les présocratiques*, Paris, Gallimard, 1988, p.219.

<sup>9</sup> Aetius, *Opinions*, IV, XVI, 2, in Jean Paul Dumont, *Les présocratiques*, Paris, Gallimard, 1988, p 220.

<sup>10</sup> Aristote, *Histoire des animaux*, I, 11, 492a13, in Jean-Paul Dumont, *Les présocratiques*, Paris, Gallimard, 1988, p 220.

<sup>11</sup> Théophraste, in Paul Tannery, p 358.

<sup>12</sup> *ibidem*.

<sup>13</sup> *ibid.*



déployée, car l'air qui est dans les oreilles est mû, et meut l'air interne». Il y a donc dans l'oreille deux types d'air, celui qui sert d'interface avec l'air ambiant, et l'air interne, enfermé dans la cavité. Et Diogène poursuit :

Lorsque le conduit est plus large, le mouvement de l'air produit un remous et le son manque de force, parce qu'il ne vient pas frapper de l'air immobile.

On est frappé de la tentative de modélisation d'inspiration mécanique qui n'est pas dépourvue de pertinence, si on accepte l'existence de cet air intérieur immobile.

## Archytas

Archytas, qui vivait approximativement au temps de Platon (il était son aîné d'une douzaine d'année), était une sorte de physicien pythagoricien. C'est sans doute un des premiers à avoir eu une démarche d'observation de la production et de la propagation des sons. Dans un fragment cité par Porphyre, Archytas, après avoir décrit la production des sons comme résultant de chocs, s'intéresse à l'intensité des sons<sup>14</sup> :

Or beaucoup de ces bruits sont tels que notre nature ne nous permet pas de les percevoir, soit en raison de la faiblesse du choc, soit parce qu'une grande distance nous en sépare, soit encore en raison de l'excès d'amplitude de ces bruits (car les bruits de forte amplitude ne pénètrent pas en notre ouïe, de la même façon que rien ne pénètre à l'intérieur d'un vase à l'embouchure étroite, quand on veut y verser une [trop] grande quantité [de liquide]).

Si ces observations semblent tomber sous le sens, parce qu'elles sont évidentes, elles introduisent une préoccupation encore inédite, celle des variations de l'intensité sonore. L'intensité est liée à la violence du choc sonore, elle varie avec la distance, et n'est que l'expression d'une sensation sujette à l'imperfection de l'ouïe. Cette idée des sons trop intenses qui ne sont pas perçus, est très porteuse. En effet, elle suppose que la nature est très bruyante, parce que tous les mouvements sont sonores, puisqu'ils percutent le milieu. Cette idée permet de résoudre la question des mouvements apparemment silencieux, parce que d'une intensité sonore trop grande, et en particulier le mouvement des corps célestes.

## Lasos d'Hermione

On ne dispose pas de textes de Lasos (env. 500 avant notre ère), mais on sait qu'il est probablement l'auteur du plus ancien écrit connu sur la musique. Avec Lasos on aborde un aspect particulier de la sensation sonore, il s'agit de la perception de la hauteur de son et des intervalles. Lasos n'était pas pythagoricien, et, à l'inverse des mathématiciens, il attribuait une 'largeur' aux sons, ce qu'on doit comprendre comme une certaine marge autour de la hauteur d'un son. Cette position a été vigoureusement combattue par Aristoxène<sup>15</sup> :

Il sera indispensable, si l'on ne veut pas faire comme Lasos et quelques autres musiciens, disciples d'Épigonos, qui pensaient que le son a une sorte de largeur, de parler à ce sujet avec un peu plus d'exactitude [qu'ils n'ont fait];

Aristoxène, pourtant souvent présenté comme un adversaire des théories mathématiques concernant la musique, rejoint ici les canoniciens et les pythagoriciens, lorsqu'il défend que la hauteur d'un son est sans 'surface', comme un point sur une ligne, condition indispensable à la construction mathématique de l'échelle musicale.

Pour Lasos c'était sans doute ici le fruit de ses expériences sur les instruments à vent qui nous ont été rapportées par Adraste puis Théon de Smyrne. Paul Tannery se range à cet avis de bon sens qui est pourtant encore combattu de nos jours par certains puristes 'décortiqueurs de comma'<sup>16</sup> :

<sup>14</sup> Cet extrait a été traduit par Diels, à partir du *Commentaire sur les Harmoniques de Ptolémée*, écrit par Porphyre au III<sup>e</sup> siècle.

Hermann Diels, *Die Fragmente der Vorsokratiker*, trad. française par J.-P. Dumont, *Les présocratiques*, Gallimard, Paris, 1988, p.533-535.

Une étude approfondie sur Archytas est parue récemment : Carl A. Huffman: *Archytas of Tarentum. Pythagorean, Philosopher and Mathematician King*, Cambridge University Press 2005. Huffman exprime quelques doutes sur l'exactitude du texte transmis par Porphyre, mais ce passage semble correct.

<sup>15</sup> Aristoxène, *Eléments harmoniques*, livre 1, chap. II, 4. Trad. C. E. Ruelle, Paris, P. Haffner, 1870.

<sup>16</sup> Paul Tannery, L'évolution des gammes antiques, in *Mémoires scientifiques*, t III, Paris, Gauthier Villars, 1915, 1995, p 315.

Rappelons que le comma pythagoricien est le rapport entre 12 quintes et 7 octaves, et que le comma zarlinien est le rapport entre 4 quintes et une tierce juste à 2 octaves (ou encore entre un demi-ton majeur et un demi-ton mineur). Le comma (P. ou Z.) est approximativement égal à un neuvième de ton. Le schisma est le rapport entre les deux types de commas (P. et Z.). De nos jours on divise une octave en 300 savarts ou en 1200 cents. Le

Lasos avait donc posé le véritable principe de la pratique, d'après lequel on ne peut distinguer deux notes dont la différence de hauteur ne dépasse pas une certaine valeur. [...] En tous cas le principe posé par Lasos est le vrai [...] ; le fait expérimental est qu'une note donnée par un artiste, avec un instrument à sons fixes ou non, et trouvée juste par l'oreille la mieux exercée, n'a pas de valeur constante et ne se rapproche que plus ou moins de la valeur théorique.

L'approche physique de la perception des sons a toujours été rendue difficile par la rigueur et la précision des mathématiciens qui ont toujours vu dans la musique un terrain de jeu dans lequel ils pouvaient s'épanouir. C'est pourquoi les théories de la perception des sons, avant Aristote, sont peu abordées, mais qu'en revanche, les mathématiques apportent à cette époque, une construction très élaborée des sons envisagés selon leur hauteur, avec l'élaboration de la gamme pythagoricienne et de la théorie des intervalles. Il est à ce sujet curieux qu'aucun écrit des auteurs canoniciens ou pythagoriciens, de Pythagore à la Renaissance, ne fasse allusion à la seule méthode qui existe pour accorder les instruments de musique, et que les luthiers et les musiciens connaissent de toujours, la méthode des battements. C'est dire le peu d'importance de la pratique musicale de nos savants dans leur étude mathématique si rigoureuse de la musique.

## Platon et Aristote

On entre ici dans la période classique de la pensée grecque, importante, non seulement par la qualité des philosophes qui l'ont marquée, mais surtout parce que leurs écrits ont été choisis par les générations futures comme dogme destiné à constituer le socle de la connaissance et de la pensée pour quelques siècles. Cette préférence presque idéologique s'est faite au détriment de nombreux écrits qui ont tout simplement disparu, jugés hors normes par le discours dominant. C'est notamment le cas des écrits d'inspiration atomiste et de la physique stoïcienne dont nous ne disposons aujourd'hui que de sources secondaires. Et comme l'acoustique physique ne fait pas partie des préoccupations de nos philosophes consacrés, il faut, pour dénicher quelques passages sur le sujet, parcourir leur oeuvre à grands pas, et ne pas tenter d'en faire le commentaire philosophique exhaustif. Seule l'étude physique des sons nous intéresse ici et, dans cette partie, leur perception par les êtres vivants. Cependant les différentes théories seront, bien entendu, exposées dans le contexte plus général des systèmes platoniciens et aristotéliens avec leurs évolutions.

### Platon

Platon évoque la nature des sons à trois reprises dans le *Timée*, dialogue tardif essentiellement consacré à la cosmologie ainsi qu'à la place de l'homme dans l'univers, et à cette occasion, aux sens et à la perception. Le premier passage expose l'importance de l'harmonie, donnée par les dieux « afin de nous aider à régler et à mettre à l'unisson avec elle-même la révolution dérégulée de l'âme en nous » (47b-48b). Le second extrait définit le son « comme un coup donné par l'air à travers les oreilles au cerveau et au sang et arrivant jusqu'à l'âme » (67b-67c). Enfin le troisième texte, sans doute le plus intéressant, expose une théorie de la propagation des sons et de leur perception selon leur hauteur (80a-80b).

On pense généralement que les théories acoustiques de Platon lui ont été inspirées par son ami et aîné Archytas. Il est vrai que Platon, en dehors de quelques considérations dans *La République* sur le rôle de la musique dans la direction de l'éducation des jeunes âmes, n'a pas beaucoup étudié le sujet, ce n'était pas dans ses préoccupations. Son influence a pourtant été grande, et, toujours dans le *Timée*, il expose de façon métaphorique la théorie des médiétés<sup>17</sup>, et construit la division du tétracorde selon le genre diatonique, genre plutôt classique et pythagoricien, c'est-à-dire deux tons égaux (9/8) et un 'limma' ('reste', en grec) dont le rapport est égal à 256/243 (approximativement un demi-ton diminué). Platon est rigoureux, il refuse les nouveaux genres

---

comma P. est égal à 5,9 savarts, et le comma Z. à 5,4 savarts. D'où le schisma qui est égal à la différence, soit environ un demi-savart.

Tous ces micro-intervalles n'intéressent que les théoriciens et les facteurs d'instruments, ils sont quasiment imperceptibles. On considère généralement que le comma est le seuil de perception d'une oreille exercée, dans des conditions favorables.

Il convient de distinguer plusieurs cas où les micro-intervalles entrent en jeu. Lorsque deux instruments, ou deux voix, s'accordent, une différence d'un comma est très perceptible, elle correspond à un battement de 6 Hz pour un 'la' à 440 Hz. Deux intervalles proches, joués isolément et successivement, dont la différence est d'un quart de ton (environ 2 commas) se perçoivent distinctement par une oreille musicienne. En revanche, dans une phrase mélodique chantée *a capella*, une différence d'un quart de ton est difficilement repérable sur des intervalles larges. Dans une ambiance bruitée (c'est-à-dire avec accompagnement) le phénomène est encore plus accentué, et davantage encore lors de sons impulsifs (moins d'une demi-seconde). Voir à ce sujet E. Zwicker et R. Feldkeller, *Psychoacoustique*, Paris, Masson, 1981.

<sup>17</sup> Platon, *Timée*, 34c-36c, Ed. Emile Chambry, Paris, GF, 1969, p.415.

chromatiques (le tétracorde est composé alors d'un diton proche de la tierce mineure et de deux petits intervalles) et enharmoniques (avec un diton proche de la tierce majeure) qui lui semblent trop sensuels. Pourtant l'introduction de ces nouveaux intervalles montre à quel point la perception auditive des grecs cultivés s'était sophistiquée et que la musique pouvait également contenir une charge émotive. Ce n'est pas dans cette direction que Platon entend éduquer les âmes. Pour Platon, la musique et la parole doivent être pratiquées dans un seul but, l'Harmonie, et non dans la recherche du plaisir irraisonné<sup>18</sup> :

Il faut répéter la même chose au sujet de la voix et de l'ouïe : c'est en vue du même objet et pour les mêmes raisons que les dieux nous les ont données. En effet la parole nous a été octroyée pour la même fin et elle contribue dans la plus large mesure à nous la faire atteindre, et toute cette partie de la musique consacrée à l'audition de la voix nous a été donnée en vue de l'harmonie. Et l'harmonie, dont les mouvements sont apparentés aux révolutions de l'âme en nous, a été donnée par les Muses à l'homme qui entretient avec elles un commerce intelligent, non point en vue d'un plaisir irraisonné, seule utilité qu'on lui trouve aujourd'hui, mais pour nous aider à régler et à mettre à l'unisson avec elle-même la révolution déréglée de l'âme en nous. Les mêmes déités nous ont donné aussi le rythme pour remédier au défaut de mesure et de grâce dans le caractère de la plupart des hommes.

L'ouïe donc est destinée à nous faire atteindre l'Harmonie, que ce soit celle de l'âme perturbée, ou celle qui se dégage de la communication avec nos semblables, au moyen de la parole. La perception des sons de la nature n'est pas évoquée, ni l'usage atavique des sons comme signal d'une modification de l'environnement. C'est pourtant la principale fonction du chant des oiseaux, que les hommes jugent si harmonieux.

Platon, toujours dans le *Timée*, entreprend l'étude des sensations et parle brièvement de l'ouïe, dans un passage que tous les historiens de l'acoustique connaissent<sup>19</sup> :

D'une manière générale nous pouvons définir le son comme un coup donné par l'air à travers les oreilles au cerveau et au sang et arrivant jusqu'à l'âme. Le mouvement qui s'ensuit, lequel commence à la tête et se termine dans la région du foie, est l'ouïe. Ce mouvement est-il rapide, le son est aigu; s'il est plus lent, le son est plus grave; s'il est uniforme, le son est égal et doux; il est rude dans le cas contraire; il est fort grand, lorsque le mouvement est grand, et faible, s'il est petit. Quant à l'accord des sons entre eux, c'est une question qu'il nous faudra traiter plus tard.

Platon ignore la production et la propagation du son, sans doute de façon délibérée, car ce n'est pas son sujet. Il commence sa description au niveau de l'oreille qui reçoit les coups transportés et communiqués par l'air. On retrouve cette notion de coups pratiquement chez tous les auteurs anciens, et il faut sans doute y voir l'importance qu'ils donnaient à la violence de l'effet sonore, capable de se propager si loin en imprimant une sensation aussi forte. On sait maintenant que l'énergie mise en jeu est très faible, mais il est tout à fait compréhensible que telle était la façon de voir à cette époque. En revanche Platon ne s'étend pas sur la nature de ces coups, et en particulier du mouvement qui les produit, corpusculaire ou 'pneumatique'. On sait seulement que le cerveau subit ces coups, ainsi que le sang. De même, le mouvement qui s'ensuit, sans doute propagé par le sang, s'étend dans le corps. On imagine que Platon fait allusion à certains sons particulièrement intenses, qu'on perçoit dans le corps entier tels que le tonnerre, les chutes d'objets ou les voix très puissantes. Viennent ensuite les caractères des différents sons, l'acuité liée à la vitesse, comme chez Archytas (nous y reviendrons plus largement plus loin), la douceur liée à l'uniformité, on dirait aujourd'hui l'enveloppe, et l'intensité provoquée par l'ampleur du mouvement, sans doute la quantité d'air déplacé, mais on n'en saura pas plus.

Le troisième passage sera traité dans la partie concernant les mouvements du son.

## Aristote

Aristote parle des sons lorsqu'il traite de la perception dans *De sensu et sensibili*, mais l'essentiel de sa théorie sur la nature physique des sons se trouve dans le *De anima*, au chapitre 8 du livre II. Il existe également un traité, *De audibilibus*, longtemps attribué à Aristote, mais dont on est à peu près certain qu'il est plus tardif, et probablement de Straton. De même, les *Problemata*, ou *Problèmes d'Aristote*, qu'il est de nos jours convenu d'attribuer à ses successeurs, sans qu'on puisse les préciser. Dans ces textes il est fait mention de la nature physique des sons, notamment les *Problemata* XI et XIX, qui traitent de la voix et de l'harmonie.

Aristote, dans ce passage du *Traité de l'âme*, distingue l'étude du son de celle de l'ouïe, il analyse tout d'abord la production et la propagation des sons, nous y reviendrons, puis il entreprend l'explication de l'audition<sup>20</sup> :

<sup>18</sup> *Id.*, 47b-48b, p.426.

<sup>19</sup> *Id.*, 67b-67c, p.445.

<sup>20</sup> Aristote, *Traité de l'âme*, trad. Pascale Nau d'après Bodeüs, II, 8, 420a.

Est donc sonore le corps capable de mettre en mouvement une masse d'air, laquelle est une par continuité jusqu'à l'organe de l'ouïe. Il existe une masse d'air qui est dans une union naturelle avec l'organe de l'ouïe. Et par le fait que cet organe se trouve dans l'air si l'air extérieur est mis en mouvement, l'air intérieur de l'oreille est mû lui aussi. De là vient que l'animal n'entend pas en tous les points de son corps, et que l'air non plus ne le pénètre pas partout. Car ce n'est même pas en tous ses points que la partie du corps elle-même qui doit se mouvoir et émettre un son, renferme de l'air.

[...] Quant à l'air qui réside dans les oreilles, il y a été emprisonné pour y être immobile, de façon à percevoir avec exactitude toutes les différences du mouvement.

Aristote se range à l'avis général, l'oreille comprend une cavité qui contient un 'air interne'. Cet air est immobile, Aristote veut dire qu'il reste en place et ne s'évacue pas, et constitue l'interface entre l'air extérieur, en mouvement, et l'organe sensoriel. Cet air est nécessaire à la perception des sons, et donc Aristote évacue la théorie d'Alcméon sur le vide qui réagit à l'air, la participation de toutes les parties du corps à l'audition que défendait Démocrite, ainsi que les 'grelots' d'Empédocle. Par ailleurs, la masse d'air est 'une par continuité', ce qui constitue une réfutation des arguments atomistes.

L'air interne est isolé de l'extérieur par les 'spirales', ce qui nous permet d'entendre dans l'eau. Aristote cite également la membrane auditive qui, endommagée, provoque la surdité. Pour savoir si on est sourd<sup>21</sup> :

Nous avons un signe pour reconnaître si l'on entend ou non : c'est que l'oreille saine résonne perpétuellement comme une corne car l'air emprisonné dans les oreilles se meut perpétuellement d'un mouvement propre.

Pourtant le son reste quelque chose d'étranger et n'est pas propre à l'oreille même. Et c'est pour cela qu'on dit communément que nous entendons par le moyen du vide et de ce qui résonne : c'est que nous entendons, en effet, par l'organe qui contient de l'air, et un air délimité.

Le vide dont parle Aristote est le synonyme qu'il donne ici à l'air, il est clair que la question du vide est rapidement résolue<sup>22</sup> :

On dit avec raison que le vide est la cause déterminante de l'audition, car, dans l'opinion commune, le vide c'est l'air, lequel est bien la cause efficiente de l'audition, quand il est mû comme une masse continue et une.

## Les atomistes : Démocrite, Epicure, Lucrèce

Revenant un peu en arrière, on trouve, aux côtés du courant socratique et platonicien, une pensée philosophique très différente, qui se révélera matérialiste et déterministe, ce qui constituait à l'époque une forme de pensée presque hérétique.

Démocrite, on le sait, est avec Leucippe, l'initiateur du courant qu'on appellera 'atomiste' par la suite. Sa théorie de la matière repose sur l'existence d'atomes très petits, insécables, qui baignent dans le vide. Pour Démocrite, la notion de vide est essentielle, et distincte de l'air qui, lui, est constitué d'atomes. L'air est compressible, par le rapprochement des atomes qui le composent, et c'est une innovation. Démocrite ne prend pas parti dans le débat sur les sensations créées par les semblables ou les contraires. Sa théorie de l'ouïe fait intervenir à la fois l'air et le vide<sup>23</sup> :

L'air tombant dans le vide y produit un mouvement. Si d'ailleurs il peut pénétrer de même dans tout le corps, il entre surtout, et en plus grande quantité, dans les oreilles, là où il y a le plus de vide, et il traverse sans séjourner. Aussi la sensation a-t-elle lieu là, et non dans le reste du corps. Une fois dedans, sa vitesse le fait se dissiper, car le son résulte d'un air condensé et entrant avec force. La sensation interne se fait comme, à l'extérieur, celle du toucher.

L'air est en quelque sorte porteur du son, et c'est en prenant la place du vide qu'il produit un mouvement. Et tout naturellement dans les oreilles, puisqu'il s'y trouve plus de vide. Une 'condensation' de l'air se produit alors et l'air se dissipe après avoir légué son information sonore à l'organe sensoriel de l'ouïe, qui fonctionne comme le toucher. Cette 'condensation' correspond à une amplification de la sensation du toucher propre à l'oreille, et on n'est pas loin de la théorie actuelle de l'audition, dans laquelle les vibrations captées au niveau du tympan sont en quelque sorte amplifiées par l'adaptation d'impédance résultant de leur transmission par les osselets de l'oreille moyenne. Pour Démocrite, l'air transporte les effluves émises par les objets, et il développe longuement cette théorie pour la vision. Il en est de même pour les sons, les corps sonores émettent

<sup>21</sup> *Ibidem*.

<sup>22</sup> *Id.* 419b.

<sup>23</sup> Théophraste, *Sur les sensations*, in Paul Tannery, *Pour une Histoire de la science hellène*, Paris, Gauthier Villars, 1930, p 367.

des effluves, des 'effigies', d'une certaine forme qui est conservée jusqu'à leur perception par l'oreille, mais qui s'émettent en corpuscules lors de leur transport dans l'air. On est proche des '*eidolas*' dont parleront Epicure et Lucrèce. Par ailleurs, pour Démocrite, si les oreilles sont bien le siège de l'audition, le reste du corps participe également à la perception des sons. En effet, à l'inverse des ses prédécesseurs, Démocrite suppose le son indépendamment de l'oreille qui le perçoit, c'est en quelque sorte la configuration de l'oreille qui permet l'audition. Pour Démocrite les sons existent de façon autonome dans l'air, et c'est parce que l'oreille est adaptée et prête à les recevoir que l'audition fait son effet. On a vu, à l'inverse, qu'Empédocle pensait que l'oreille produisait des effluves, tout comme les corps sonores. Cette approche de la perception était également développée pour la vision : on pensait alors que l'œil émettait un rayon qui venait à la rencontre des émanations des corps visibles. Pour Démocrite le rayonnement corpusculaire, qu'il soit visuel ou sonore, est le fait du corps émetteur, l'organe sensoriel étant le récepteur, le milieu de propagation assurant le transport fidèle des effigies qui conservent la 'forme' initiale des émissions jusqu'à l'organe.

Théophraste combat vigoureusement cette théorie des effigies, car pour lui, comme pour Aristote, la matière est continue et ces empreintes ne peuvent être qu'immatérielles, puisqu'elles n'ont pas de densité.

La théorie des simulacres, ou empreintes, on dira bientôt *eidola*, est inspirée des effluves d'Empédocle. Il s'agit d'émanations provenant des corps, émises en permanence, et transportant un certain nombre d'informations sur ces corps. Elles sont éventuellement captées par les organes sensoriels lorsqu'ils se situent sur leur trajet. Ces simulacres sont composés d'atomes particuliers mais ne sont pas des objets, ils en sont la 'forme' perceptible par les sens. De ce point de vue, les sensations se réduisent au sens tactile, paramétré de façon particulière pour chaque organe. C'est ainsi qu'Epicure, après avoir développé le processus de vision et d'audition, généralise à l'odorat et au goût<sup>24</sup> :

Il faut penser que, comme pour l'ouïe, jamais aucune affection ne se ferait en nous s'il n'y avait pas des corpuscules transmis de l'objet à nous, et si harmonieusement faits qu'ils émeuvent ce sens, les uns étant disposés de façon à le troubler, et à contrarier sa nature, les autres de façon à lui donner l'impression nette qui lui convient.

Ce qui permet à Michel Serres de conclure la partie qu'il consacre aux sens dans son ouvrage sur Lucrèce écrit dans une très belle langue<sup>25</sup> :

Nous savons désormais comment ces mues, ces carapaces fines se décollent à l'émission. Et nous savons comment, c'est-à-dire à quelle vitesse, elles traversent l'espace de communication. Au but, à la réception, l'appareil sensoriel entre en contact avec cette robe fine. Dès lors, la vue, l'odorat, l'ouïe et ainsi de suite, ne sont que des touchers. La sensation n'est qu'un tact généralisé. Le monde n'est plus à distance, il est à proximité, comme tangible. La théorie des simulacres est un cas singulier de la théorie générale des flux, la communication est une circulation parmi d'autres, la connaissance n'est pas différente de l'être.

Pour les atomistes, les sensations sont des perceptions tactiles de flux d'atomes, différenciés plus par les organes qui les reçoivent que par leur nature propre. On retrouve ici cette idée de Démocrite décrivant l'ouïe comme une aptitude particulière de l'organe de l'oreille à percevoir les sons qui circulent dans tout le corps. En quelque sorte l'oreille existe comme agrégation inopinée d'atomes la constituant, et s'est trouvée adaptée à la réception de ces flux sonores. On fera dire par la suite aux atomistes qu'ils défendaient une conception de l'existence des organes sensoriels précédant l'apparition des stimuli. C'était bien entendu dans une vision finaliste de la nature, oeuvre d'un créateur qui, lui, aurait doté l'homme de l'oreille dans le but d'entendre les sons. Les atomistes ne prétendaient rien de tel, mais affirmaient seulement l'existence d'une nature décrite comme telle, avec son histoire mais sans démiurge, et surtout sans dessein. Cette vision matérialiste, fort mal explicitée et tellement combattue qu'elle n'a pas pu bénéficier d'une activité intellectuelle de recherche et d'observation comme par exemple le courant péripatéticien, a été inféconde pendant plusieurs siècles, avant de réapparaître vers la fin de la Renaissance. Les écrits atomistes, sauf ceux de Lucrèce, ont presque tous disparu et n'existent dans l'histoire des idées que par les citations qu'en ont faites leurs détracteurs, Aristote pour Démocrite, Cicéron pour Epicure, et bien entendu Diogène Laërce. Avec l'installation du despotisme intellectuel des spiritualistes, leurs écrits ont été détruits et leur pensée vigoureusement dénigrée.

## **La tradition aristotélicienne au Moyen Âge**

Le *De anima* (De l'âme) a été l'objet de nombreuses traductions, commentées et adaptées, tout au long du Moyen Âge.

<sup>24</sup> Epicure, *Lettre à Hérodothe*, in Diogène Laërce, *Vie des philosophes*, trad. Ugo Bratelli.

<sup>25</sup> Michel Serres, *La Naissance de la Physique*, Paris, Ed. Minuit, 1977, p 134.

Un des premiers exégète du philosophe est sans doute le philosophe Alexandre d'Aphrodise qui écrit vers le III<sup>ème</sup> siècle plusieurs commentaires des textes d'Aristote, à partir des textes grecs, qui feront l'objet de plusieurs éditions à la Renaissance. Il est suivi peu après par Themistius (317-388), philosophe néo-platonicien et homme d'Etat sous l'Empire Byzantin aux débuts de l'ère chrétienne. Les paraphrases de Themistius constituent une tradition des textes d'Aristote qui sera adoptée par l'Eglise et l'université de Paris au XIII<sup>ème</sup> siècle. Pourtant dans un premier temps, l'Université et l'Eglise rejettent Aristote, et c'est à Thomas d'Aquin qu'on doit sa réhabilitation après qu'il en fait un commentaire adapté à la doctrine de l'Eglise. S'inspirant de l'ouvrage de Thémistius, *Paraphrasis aristotelis*, traduit en latin par Guillaume de Moerbeke vers 1260, Thomas d'Aquin rédige son *Commentaire au Traité de l'Ame*, ce qui constitue une démarche audacieuse auprès de l'autorité ecclésiastique, d'autant qu'il s'inspire également du travail d'Averroès qu'il critique pourtant. Plus tard, dès l'apparition de l'imprimerie on édite les œuvres du Stagirite, et en particulier le *Traité de l'Ame*, selon des traductions du grec (Argyropylos, Sophianos, Zimara, etc.) et avec les commentaires, soit de Thomas d'Aquin, soit d'Averroès. Parallèlement, de nombreux textes attribués par erreur à Aristote circulent sous le nom de *Problemata*, ou encore le célèbre *Secretum secretorum Aristotelis ad Alexandrum* dont on connaît de nombreuses versions.

Les raisons du rejet par l'Eglise des thèses d'Aristote se fondaient surtout sur des questions théologiques, la métaphysique notamment était alors d'inspiration platonicienne, véhiculée par Augustin et les Pères de l'Eglise. En revanche, sur le plan scientifique, la Physique et les Sciences Naturelles d'Aristote pouvaient très bien convenir aux thèses chrétiennes, puisqu'elles respectaient l'idée de l'âme et de Dieu créateur du monde. Le polythéisme grec pouvait fort bien, moyennant quelques adaptations, se mouler dans le monothéisme trinitaire, d'autant que l'autorité ecclésiastique était très demandeuse d'un système scientifique cohérent, en ces temps où la compréhension du monde commençait à devenir une préoccupation. On a donc assisté d'abord aux travaux de quelques franciscains anglais, comme Robert Grosseteste et Roger Bacon, puis de Thomas d'Aquin, d'Albert le Grand et de quelques autres.

Le *Traité de l'Ame* occupe donc une place essentielle, puisque sa fonction est de constituer le dogme à la fois théologique, sur le plan de l'entité spirituelle qui nous donne autonomie et conscience, et scientifique par son explication des sensations. Dans son *Commentaire*, Thomas d'Aquin se livre à une rigoureuse explication de texte, scindant l'ouvrage en courts passages auxquels il apporte éclaircissements et compléments.

Concernant le passage qui nous intéresse, sur l'ouïe, c'est-à-dire le chapitre 8 du livre II du *De anima*, Thomas d'Aquin se contente d'une paraphrase presque systématique. Juste un petit développement sur la phrase « On dit avec raison que le vide est la cause déterminante de l'audition, car, dans l'opinion commune, le vide c'est l'air, lequel est bien la cause efficiente du son ». Alors qu'Aristote, dans cette phrase elliptique renvoie dos à dos, de façon discrète, les ignorants et Démocrite qui pensent que le vide est nécessaire au son, Thomas d'Aquin juge nécessaire de s'attarder un peu. C'est qu'il s'agit de combattre dans l'oeuf toute idée atomiste, n'oublions pas que la nature a horreur du vide. Il explique donc :

Puisque le milieu, pour le son, c'est l'air, commence-t-il, d'aucuns affirment correctement que le vide est propre au sens de l'ouïe, du fait qu'il leur semble que l'air soit vide. [...] Ceux qui disent que le vide est propre au sens de l'ouïe disent une chose correcte, parce que l'essence propre de l'ouïe appartient à l'air dit vide. Mais ils ne parlent pas correctement en considérant comme vide ce qui est plein d'air.

Par ailleurs Thomas d'Aquin s'inspire également, dans ce passage, des écrits de Boèce, et notamment de son *Institutione Musica*, nous y reviendrons.

## 2 - Le son est nombre

### ***La légende des marteaux de Pythagore : première représentation des intervalles musicaux par des nombres***

Nous ne disposons pas de trace écrite des théories construites et enseignées par Pythagore au VI<sup>ème</sup> siècle avant notre ère. Pourtant quelques anecdotes ont traversé les siècles et ont été transmises comme autant d'illustrations des principes mathématiques développés par le savant de Samos. Parmi celles-ci, il en est une qui concerne la musique, ou plus exactement la théorie des consonances. Il s'agit de la légende des marteaux de Pythagore, rapportée notamment dans le *De institutione Musica* par Boèce qui l'aurait lui-même découverte lors de sa traduction des textes de Gaudence, de Jamblique et de Nicomaque de Gerasse. Cette histoire a tellement accompagné l'enseignement de l'harmonie qu'il était nécessaire de s'y attarder pour en éprouver la validité.

#### **La version académique : Boèce**

Pythagore, dit Boèce, se méfie du jugement des sens pour faire une description objective des consonances, et il cherche une méthode fiable, à la fois indépendante de notre subjectivité, et de la variabilité de l'environnement. Laissons Boèce raconter l'histoire des marteaux de Pythagore<sup>26</sup> :

X. Voilà la principale raison pour laquelle Pythagore, après avoir abandonné le jugement des oreilles, se tourna vers l'instance des règles. N'accordant aucune confiance aux oreilles des hommes, lesquelles varient sous l'effet tantôt de la nature, tantôt de circonstances externes, tantôt avec l'âge, il ne se soucia pas davantage des instruments, sources de grande variabilité et d'inconstance. Ainsi, considérons par exemple les cordes : l'air, selon qu'il est plus humide ou plus sec, étouffe ou aiguise la vibration; la corde, selon son épaisseur rend un son plus grave, ou plus aigu selon sa finesse, ou de quelque autre façon, l'état de stabilité antérieur se modifie.

Or, comme il en allait de même sur tous les autres instruments, Pythagore, qui jugeait qu'ils étaient tous sans intérêt et très peu dignes de foi, et s'en préoccupait depuis longtemps, recherchait par quelle opération il parviendrait, de manière ferme et constante, à une pleine connaissance des éléments d'appréciation des consonances. Sur ces entrefaites, tandis qu'il longeait, comme poussé par une inspiration divine, des ateliers d'artisans, il entendit des coups de marteaux dont les divers sons produisaient en quelque sorte un accord harmonieux. C'est ainsi qu'en présence de ce qu'il cherchait depuis longtemps, il s'approcha, tout étonné, de l'ouvrage. Après mûre réflexion, il fut d'avis que la diversité des sons dépendait de la force des ouvriers et pour que cela apparût plus clairement, il leur ordonna d'échanger les marteaux. Or la propriété des sons ne tenait pas à la vigueur des hommes : elle était inhérente aux marteaux que l'on venait d'échanger. Lorsqu'il s'en aperçut, il examina le poids des marteaux. Or il se trouvait qu'ils étaient au nombre de cinq. Il en trouva un qui pesait le double d'un autre : ils se répondaient à la consonance d'octave. Celui qui faisait le double de l'autre était en rapport sesquiterce à l'égard d'un autre avec lequel il résonnait à la quarte<sup>27</sup>. Il découvrit ensuite que ce même marteau - celui qui était le double de l'autre - était en rapport sesquialtère à l'égard d'un autre avec lequel il formait une consonance de quinte. En revanche, il découvrit que les deux dont il fut prouvé que le premier - le double - était en rapport sesquiterce et sesquialtère à leur égard, observaient mutuellement un rapport sesquioctave. Le cinquième marteau fut laissé de côté, étant dissonant à l'égard de tous. Donc, comme avant Pythagore déjà, les consonances de musique étaient appelées les unes «octave», d'autres «quinte» et d'autres «quarte» - qui est la plus petite consonance - Pythagore fut le premier à découvrir de cette façon-là la proportionnalité qui fonde cette concorde de sons.

Pour la clarté du propos, prenons à titre d'exemple quatre poids de marteaux représentés ci-dessous par les chiffres 12, 9, 8, 6. Les marteaux qui étaient en rapport de poids 12 à 6, faisaient entendre l'octave selon un rapport double. Le marteau de poids 12 par rapport à celui de poids 9 et le marteau de poids 8 par rapport à celui de poids 6 formaient une consonance de quarte selon un rapport épitrète. En revanche, les marteaux de poids 12 à celui de poids 8 et de poids 9 à celui de

<sup>26</sup> Boèce, *Institutione musica*, lib.I, cap.X, trad. Christian Meyer, Brepols, Turnout, 2004, p.47-48.

<sup>27</sup> Pour une plus grande clarté, le rapport sesquiterce (ou épitrète) signifie  $4/3$  et représente l'intervalle diatessaron ou quarte, et le rapport sesquialtère (ou hémiole) signifie  $3/2$  et représente l'intervalle diapente ou quinte. Le rapport double ou diapason représente l'octave. Le rapport  $9/8$  est dit sesquioctave et correspond au ton (fa-sol par exemple). Ces rapports s'entendent, pour Pythagore, entre des nombres sans grandeur (ce sont les rapports de fréquences d'aujourd'hui), et correspondent aux rapports inverses des longueurs de cordes du monocorde. Sachant que la longueur totale de la corde est 1, l'octave est  $1/2$ , la quinte c'est  $2/3$ , la quarte  $3/4$ .

poids 6 réalisaient une consonance de quinte. Mais les marteaux de poids 8 à 9 faisaient entendre un ton selon un rapport sesquioctave.

XI. De retour en sa demeure, il se livra à de multiples évaluations pour savoir si toute la théorie des symphonies se résumait à ces rapports. Tantôt il adaptait aux cordes des poids équivalents et appréciait à l'oreille leurs consonances, tantôt il reportait le double sur la longueur des roseaux, rajoutait une moitié et réalisait tous les autres rapports : par ses multiples expériences il atteignit une totale certitude. Parfois même, à titre de mesure, il versait dans des récipients un nombre de cyathes d'un poids équivalent ; d'autres fois il frappait à l'aide de baguettes d'airain ou de fer des récipients de poids divers. Il put se réjouir de ne trouver aucune fluctuation. De là, il passa à l'examen de la longueur et de l'épaisseur des cordes. C'est ainsi qu'il trouva la règle dont il sera question plus loin. Elle est ainsi nommée, non parce que la règle, à l'aide de laquelle nous mesurons le son et les dimensions des cordes, est en bois, mais parce que cette sorte de règle est un instrument de contrôle si stable et sûr qu'il ne saurait induire en erreur aucun chercheur par une indication trompeuse.

Boèce (vers 470-525) occupe une place importante dans l'élaboration de la science occidentale chrétienne. Il est considéré comme un Père de l'Eglise, et ce statut confère à son œuvre théologique une autorité tout au long de l'histoire de l'Eglise. Il n'est donc pas étonnant que ses écrits scientifiques aient été largement utilisés par les premiers docteurs et savants occidentaux, puis par la suite par les doctrinaires de la science ecclésiastique de la Renaissance, et notamment par les jésuites. Ces écrits sont *Institutio arithmetica*, suivis par *De Institutione geometrica* et *Institutio astronomica*, et celui qui nous intéresse, *De institutione Musica*. On retrouve Boèce pendant tout le Moyen Âge, dans les premières universités, chez tous les théoriciens de la musique et dans nombre d'ouvrages scientifiques, jusqu'au XVII<sup>e</sup> siècle. Contemporain et probablement ami de Cassiodore, il influence les premiers encyclopédistes comme Isidore de Séville, puis plus tard Barthélemy l'Anglais, Gossuin de Metz et Vincent de Beauvais. Les théoriciens de la musique qui tentent d'élaborer un langage et une écriture à partir du chant grégorien s'appuient sur le travail de Boèce concernant les intervalles, les gammes et les modes. Guido d'Arezzo, l'inventeur de la nomenclature des notes, ou encore Franchino Gaffurio, pour ne citer que ceux-là, fondent leur théorie de la musique à partir de Boèce.

Boèce, quoique romain, connaît parfaitement le grec, ce qui n'était plus tellement fréquent en cette époque de déclin de l'épopée scientifique d'Athènes et d'Alexandrie. Il lit et traduit les textes de logique d'Aristote, mais reste influencé par le courant néo-platonicien qui était apparu quelques siècles auparavant, notamment avec Plotin. Ayant poursuivi ses études à Athènes, c'est sans doute au cours de cette période qu'il conçoit le *De Institutione Musica*. Ici, son inspiration se fait très nettement néo-pythagoricienne, et sa théorie se construit sur les écrits de Nicomaque de Gêse, important représentant de ce courant de pensée, qui lui fournira par ailleurs la matière de ses œuvres mathématiques.

Nicomaque de Gêse, vit au II<sup>e</sup> siècle et fait partie du mouvement intellectuel qui se développe autour d'Alexandrie. Nicomaque avait sans doute lu les écrits de Ptolémée et de Théon de Smyrne qui vivaient peu de temps auparavant. C'est un pédagogue, auteur notamment d'un *Manuel d'arithmétique* dont s'inspirera Boèce, et d'un *Manuel d'harmonique*, qui aurait dû faire partie d'un ouvrage plus général concernant la musique, mais dont on n'a pas d'autres traces. Ses successeurs sont Porphyre, auteur d'un long commentaire des *Harmoniques* que Ptolémée avait écrit au siècle précédent à partir des travaux d'Euclide, *La division du canon*<sup>28</sup>, et Jamblique, qui, outre sa *Vie de Pythagore*, écrit un commentaire du traité d'arithmétique de Nicomaque. Tous ces auteurs s'appuient sur la théorie musicale de Pythagore, élaborée quelque sept siècles auparavant, et transmise par ses disciples, Philolaos et Archytas, puis par Aristoxène qui s'oppose à sa théorie. Les premiers siècles de notre ère voient réapparaître des courants de pensées inspirés des anciens, comme Platon ou Pythagore, et faute d'émergence d'une nouvelle pensée, on assistait alors dans les écoles grecques, à une fascination renaissante pour les nombres et leur rapport à la perfection de la nature.

Ce courant de pensée néo-platonicien apparaîtra à nouveau vers le milieu du XV<sup>e</sup> siècle, en Italie puis en France, autour notamment de Marcile Ficin puis de Pic de la Mirandole. On assiste également à un retour de ces idées pythagoriciennes, avec Jean Reuchlin. D'Alembert, dans l'*Encyclopédie*, qualifie en le fustigeant ce courant de 'philosophie pythagoreo-platonico-cabalistique', qui perdure jusqu'à la fin du XVI<sup>e</sup> siècle, surtout en Italie, en opposition à la science scolastique officielle.

<sup>28</sup> Au début du XX<sup>e</sup> siècle, on a contesté l'authenticité du traité d'Euclide, *La division du Canon*, qui aurait été écrit peu avant par un autre auteur, peut-être Eudoxe. Voir Paul Tannery, 'Inauthenticité de la Division du canon' in *Mémoires Scientifiques*, t III, 81, p 213-219. Cependant Ch. Em. Ruelle semble maintenir la paternité du traité à Euclide (C.E. Ruelle, *Sur l'authenticité probable de la division du canon musical attribué à Euclide*, Leroux, Paris, 1906). Il semble qu'on l'attribue de nos jours à Cléonide.



## Le texte fondateur : Nicomaque de Gêrase

La légende des marteaux de Pythagore apparaît pour la première fois, en l'état actuel des connaissances, chez Nicomaque de Gêrase, dans *Harmonices manuale*. Ce manuscrit a été découvert à la fin du XV<sup>e</sup> et édité en grec à Leyde en 1616 par Meursius. Il a été traduit en latin par Marcus Meibom dans un ouvrage regroupant plusieurs textes grecs relatifs à la musique, *Antiquae musicae auctores*, paru en 1652<sup>29</sup>, puis à nouveau édité en grec et en latin par Carl von Jan à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle<sup>30</sup>.

A la fin du III<sup>e</sup> siècle, soit environ 150 ans après Nicomaque, le philosophe néo-pythagoricien Jamblique, dans sa *Vie de Pythagore*<sup>31</sup>, reprend la description de l'anecdote, sans ajouter d'éléments exploitables.

Une autre filière nous indique un texte de Gaudence, *Introductio harmonica*, qui fait également partie du recueil édité par Meibom en 1652, mais sous le nom de Gaudentius philosophicus, ce qui laisse supposer qu'il ne s'agit pas de Gaudence, évêque de Brescia à la fin du IV<sup>e</sup> siècle, dont on ne connaît que des sermons. Il semble que notre Gaudence ait vécu au I<sup>er</sup> siècle, selon Fétis, peut-être avant Ptolémée. Une traduction du texte de Gaudence par Charles Emile Ruelle<sup>32</sup> est disponible dans quelques bibliothèques.

On peut également citer Macrobe (V<sup>e</sup> siècle), qui écrit une adaptation du livre 6 du *De republica* de Cicéron, intitulé *Summa Scipionis*. Jusqu'au XIX<sup>e</sup> siècle, on ne connaissait l'ouvrage de Cicéron que par cette adaptation de Macrobe, mais on a depuis retrouvé un manuscrit qui en diffère nettement. En particulier, concernant l'extrait qui nous intéresse, qui correspond au livre II, chapitres 1 à 4 de Macrobe, Cicéron, au livre VI, chapitre 13, ne fait aucune allusion à Pythagore et à ses marteaux. Macrobe a lu les auteurs néo-pythagoriciens des siècles précédents.

A la suite de ceux-ci, on retiendra également Cassiodore, contemporain et ami de Boèce, qui écrit aussi un texte citant l'anecdote, et s'inspirant cette fois de Gaudence dont il fait l'éloge.

Nous ne rencontrons, parmi les textes des auteurs antérieurs qui ont traité de l'harmonie et de la théorie musicale, aucune allusion à cette histoire attribuée à Pythagore. Ni Cléonide dans son *Introduction harmonique*, ni dans *La division du Canon*, ni Ptolémée dans ses *Harmoniques*, ni Aristoxène par ailleurs opposé à Pythagore dans sa conception de l'harmonie, ni Aristote, ni Platon ne parlent de cette anecdote qui apparaît donc bien apocryphe et qui pourrait avoir été forgée par Nicomaque pour illustrer son exposé.

On peut s'interroger avec justesse sur l'intérêt que présente de rechercher la paternité de cette histoire. C'est qu'elle nous renseigne sur la façon dont on représente les intervalles de hauteur de son aux premiers siècles de notre ère et comment on justifie la relation entre nombres et intervalles consonants, et en particulier sur la curieuse suite 6, 8, 9, 12 qui génère les intervalles de quarte, de quinte, d'octave et de ton. Pythagore n'a pas créé un système pour les musiciens, les consonances de quarte et de quinte (qui sont en fait le même intervalle, mais renversé) sont des consonances naturelles qui s'appuient sur la présence de l'harmoniques 3, qui est consonant. Pythagore a cherché à mathématiser les intervalles, et a trouvé qu'ils étaient analogues à la série 6, 8, 9, 12. Ces intervalles constituent le socle de l'harmonie pendant deux millénaires, et on les retrouve dans toutes les civilisations, parce qu'ils s'appuient sur des rapports naturels, physiques. L'ambition probable des auteurs qui reprennent cette parabole est d'illustrer l'introduction de l'étude des consonances, et cette histoire remplit tout d'abord une fonction pédagogique. Elle permet, après l'introduction de la perception de la réalité physique par les sens, avec Aristote, et en musique avec Aristoxène, de constituer une espèce de caution expérimentale à une théorie mathématique abstraite.

La version de Nicomaque, la première dont nous disposons, est un peu plus détaillée que celle de Boèce, mais un peu moins anecdotique. Boèce se sert de cette histoire pour introduire sa théorie des intervalles,

<sup>29</sup> Cette compilation regroupe les textes suivants :

Aristoxène de Tarente "*Harmonicorum elementorum libri 3*"; Euclide "*Introductio harmonica*"; Nicomaque de Gêrase le pythagoricien, "*Harmonices manuale*" ; Alypius, "*Introductio musica*" ; Gaudence le philosophe, "*Introductio harmonica*"; Bacchius senior, "*Introductio artis musicae*"; Aristide Quintilien, "*de Musica libri 3*"; Martianus Capella, "*de Musica liber 9*".

Marcus Meibom, *Antiquae musicae auctores*, Elzevir, Amsterdam, 1652, 2 tomes.

Une partie de ces textes ont été traduits en Français par Charles Emile Ruelle : *Collection des auteurs grecs relatifs à la musique*, Impr. Nationale, Paris, 1895.

<sup>30</sup> Carl von Jan, *Musici scriptores graeci*, Leipzig, B. G. Teubneri, 1895.

<sup>31</sup> Jamblique, *Vie de Pythagore*, trad. L. Brisson, A.P. Segonds, Paris, Les Belles Lettres, 1996, p.66-68.

<sup>32</sup> *Alypius et Gaudence*, trad. Ch. Em. Ruelle, Paris, Firmin-Didot et Cie, 1897.

il ne s'encombre pas de littérature et ne conserve que ce qui est utile à son illustration. Nicomaque construit son système d'intervalles à partir de cette légende. Là où Boèce cite la suite 6, 8, 9, 12 comme un exemple, Nicomaque se fonde sur ces nombres nullement pris au hasard puisqu'ils sont les seuls entiers simples à répondre aux rapports qui déterminent les intervalles. L'ensemble de l'Introduction harmonique est un texte pédagogique destiné à expliquer le système des intervalles de façon simple, et sur ce plan, c'est assez réussi.

Voici le texte de Nicomaque<sup>33</sup> :

#### CHAPITRE VI

26. Quant à la quantité numérique qui représente la distance des cordes sonnant la quarte, celle de la quinte, celle qui par leur réunion devient ce qu'on nomme diapason (octave), enfin le ton additionnel placé entre les deux tétracordes, voici comment Pythagore, à ce qu'on affirme, s'y est pris pour s'en rendre compte.

27. Un jour qu'il se promenait tout en s'abandonnant aux réflexions et aux pensées que lui suggéraient ses combinaisons, cherchant s'il ne pourrait pas imaginer un secours pour l'oreille, sûr et exempt d'erreur, tel que la vue en possède un dans le compas et dans la règle ou même, disons-le, dans la dioptra, le toucher dans la balance, ou dans l'invention des mesures, il vint à passer, par une coïncidence providentielle, devant un atelier de forgeron, et entendit très distinctement des marteaux de fer frappant sur l'enclume et donnant pêle-mêle des sons parfaitement consonants entre eux, à l'exception d'un seul couple. Il reconnut, parmi ces sons, les consonances de diapason (octave), de diapente (quinte) et de diatessaron (quarte). Quant à l'intervalle intermédiaire entre la quarte et la quinte, il s'aperçut qu'il était inconsonant en lui-même ; mais, d'autre part, complémentaire de la plus grande de ces deux consonances.

28. Rempli de joie, il entra dans l'atelier comme si un dieu secondait son dessein, et, au moyen d'expériences variées, après avoir reconnu que c'était la différence de poids qui causait la différence de son, et non pas l'effort des forgerons ni la forme des marteaux, ni le déplacement du fer laminé, il releva avec un grand soin le poids des marteaux et leur force impulsive qu'il trouva parfaitement identique, puis il rentra chez lui.

29. Il fixa un clou unique dans l'angle formé par deux murailles, pour éviter qu'il y eût même de ce côté la moindre différence ou que, d'une manière quelconque, la pluralité des clous ayant chacun leur matière propre rendit l'épreuve suspecte. Il suspendit à ce clou quatre cordes semblables par la substance, le nombre des fils, la grosseur, la torsion, et fit supporter à chacune d'elles un poids qu'il fixa à son extrémité inférieure. De plus, il rendit les longueurs des cordes de tout point égales, puis frappant ensemble les cordes deux à deux, il reconnut respectivement les consonances précitées qui variaient avec chaque couple de cordes.

30. La corde tendue par la suspension du plus grand poids, comparée avec celle qui supportait le plus petit, lui fit constater une résonance à l'octave ; or celle-ci représentait 12 des poids donnés, et celle-là 6. Il établit ainsi que l'octave est dans le rapport double, ce que les poids eux-mêmes lui avaient fait entrevoir. La plus grande corde, comparée avec celle qui venait après la plus petite et qui représentait 8 poids, sonnait la quinte, et il établit qu'elles étaient dans le rapport sesquitiars, ce qui était aussi le rapport des poids entre eux ; puis il la compara avec celle qui la suivait, par rapport au poids supporté. La plus grande des autres cordes se trouvant avoir 9 poids sonnait la quarte, proportionnellement aux poids ; or il constata, qu'elle était dans le rapport inversement sesquitiars et que cette même corde se trouvait par nature sesquialtère de la plus petite, car 9 est à 6 dans le même rapport, de même que la corde proche de la petite et supportant 8 poids était à la corde qui en supporte 6 dans le rapport sesquitiars et à la corde de 12 poids dans le rapport sesquialtère.

34. Par conséquent, l'intervalle compris entre la quinte et la quarte, c'est-à-dire celui dont la quinte surpasse la quarte était confirmé comme se trouvant dans le rapport sesquioctave qui est celui de 9 à 8. Le diapason (octave) était le système formé par la réunion de l'une et de l'autre, autrement dit de la quinte et de la quarte placées en conjonction ; de même que le rapport double se compose du sesquialtère et du sesquitiars, soit 12, 8, 6 ; ou inversement, par la réunion de la quarte et de la quinte, de même que le double se compose du sesquitiars et du sesquialtère, soit 12, 9, 6, placés dans cet ordre.

32. Après avoir exercé sa main et son oreille à l'étude des poids suspendus et bien établi d'après ces poids le rapport des proportions constatées, il transporta ingénieusement les résultats

<sup>33</sup> Il s'agit ici de la traduction du grec au français réalisée par Charles Emile Ruelle éminent helléniste de la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle. Ruelle est parti du texte grec retrouvé en 1616 et édité par Meibom en 1652. Cette traduction est parue sous le titre : '*Manuel d'harmonique et autres textes relatifs à la musique*', dans la 'Collection des auteurs grecs relatifs à la musique', Baur, Paris, 1881.

généraux obtenus par les cordes, (lesquels provenaient du clou placé dans l'angle des deux murailles), sur la *batère* (la tablette inférieure) d'un instrument qu'il nomma *cordotone*, et la tension, portée à un point proportionnel à celles que produisaient les poids, passa dans le mouvement des chevilles placées à la partie supérieure. Une fois installé sur ce terrain et comme qui dirait en possession de ce gnomon infaillible, il étendit l'expérience en la faisant sur divers instruments, par exemple au moyen de la percussion des vases, sur les flûtes, les syrinx ; les monocordes, les trigones et autres semblables ; toujours il trouva consonante et invariablement sûre la détermination indiquée par les nombres.

33. Il nomma *hypate* le son correspondant au nombre 6, *mèse*, le son 8, qui se trouve être son sesquitiens ; *paramèse*, le son 9, plus aigu d'un ton que le son moyen et par conséquent son sesquioctave ; enfin *nète*, le son 12. Ensuite il suppléa les points intermédiaires, suivant le genre diatonique, au moyen de sons proportionnels et subordonna ainsi la (lyre) octacorde aux nombres consonants, savoir le double, le sesquialtère, le sesquitiens, et à la différence de ces deux derniers, le sesquioctave.

Sans aucun doute le résumé de Boèce est beaucoup plus compréhensible, et encore davantage par l'élégante traduction de Christian Meyer.

On relève quelques différences avec la version de Boèce, peut être dues à des copies ou à des approximations de traduction. On notera l'analogie très moderne, expérimentalisante presque, entre la vue et le compas, d'une part, et l'ouïe et ce nouvel instrument de mesure que Pythagore invente : « [...] *cherchant s'il ne pourrait pas imaginer un secours pour l'oreille, sûr et exempt d'erreur, tel que la vue en possède un dans le compas et dans la règle ou même, disons-le, dans la dioptra, le toucher dans la balance, ou dans l'invention des mesures* ». Si cette comparaison n'est pas un ajout des copistes ou des traducteurs, on constate un réel souci de quantification de la sensation qu'on pensait plus tardif. Cette préoccupation de vérification, de mesure et de réalisation est une préoccupation de physicien, et on peut trouver ici encore un argument contre l'authenticité de cette histoire. Son auteur semble plus aristotélécien, se fondant sur les sens, sur le réel, sur la mesure, que pythagoricien, constructeur d'un édifice géométrique parfait dont les briques sont les nombres, et les mathématiques la règle. Cette période des premiers siècles est emprunte à la fois d'un néo-platonisme (et néo-pythagorisme) très mathématique, et d'un aristotélisme beaucoup plus physique et expérimental.

### Les trois expériences décrites par Nicomaque

Cependant le texte de Nicomaque laisse bien apparaître la succession des expériences, qui nous fait comprendre à quel point elles ne sont pas forcément liées. La distinction entre ces trois expériences explique les deux erreurs que nous allons développer.

La première expérience est celle des marteaux : Pythagore entend les consonances des sons produits par les chocs des quatre marteaux pris deux à deux. Il procède avec justesse à des vérifications (échange des manipulateurs, constance de la force), et conclut à la relation entre les poids et les hauteurs de son. Mais, et c'est important, il ne dit pas dans quel sens. Il est tout à fait probable que le marteau le plus lourd rende le son le plus grave. Nicomaque parle de 'différence de poids qui causait la différence de son', et Boèce nous dit : 'Il en trouva un qui pesait le double d'un autre: ils se répondaient à la consonance d'octave'.

On ne sait pourquoi Boèce introduit un cinquième marteau, sans doute à cause d'une mauvaise interprétation de '*Quant à l'intervalle intermédiaire entre la quarte et la quinte, il s'aperçut qu'il était inconsonant en lui-même*', il s'agit de l'intervalle nommé sesquioctave, qui correspond à un ton, ou si l'on veut entre les poids 8 et 9. La détermination de cet intervalle est essentielle, et Boèce semble l'ignorer, ou plutôt il minimise l'importance de cette détermination, qui pour Boèce allait de soi. En effet, la démarche de Pythagore consiste ici à créer un nouveau système d'intervalles dans lequel ce rapport a une fonction centrale, on le verra.

Une fois rentré chez lui, Pythagore suspend les poids équivalents à quatre cordes égales, et c'est la seconde expérience. Cette fois les poids ne sont plus des résonateurs, comme dans l'échoppe du forgeron, mais des tenseurs. Les cordes devraient donc sonner dans les proportions inverses de celles des marteaux. En effet, si on convient bien que des corps sonores produisent un son grave lorsqu'ils sont pesants, les cordes tendues par un poids important produisent un son aigu. Il n'y a donc aucune raison de rapprocher ces deux expériences, il est clair que la hauteur des sons est déterminée par des facteurs différents dans les deux cas : les accroissements respectifs de poids d'un corps sonore rend un son grave, et de la tension d'une corde un son aigu. C'est la première erreur, évidente, et qui pourtant n'est jamais relevée par les commentateurs de cette histoire, même par nos contemporains... La seconde erreur, plus théorique, c'est bien entendu que la hauteur de son est proportionnelle au carré des poids tenseurs, et c'est le père de Galilée, Vincenzo qui en est le découvreur, vers 1585. On doit à Claude Palisca d'avoir découvert et traduit le texte de Vincenzo dans lequel ce dernier explique, avec un certain courage il faut le dire, l'erreur de Pythagore. Galilée reprendra cette théorie dans les *Discorsi* parus en 1638, on y reviendra plus loin.

Enfin, la troisième expérience, celle que l'histoire de l'acoustique musicale a retenue avec raison, c'est celle du monocorde, au cours de laquelle Pythagore associe aux longueurs d'une corde tendue les sons de différentes hauteurs qu'elle produit lorsqu'elle vibre. Cette expérience fonde la théorie des intervalles et des consonances.

Dans son texte, Boèce est nettement évasif, il nous raconte que Pythagore, de retour chez lui, pratiquait de nombreuses expériences : *'Tantôt il adaptait aux cordes des poids équivalents et appréciait à l'oreille leurs consonances, tantôt il reportait le double sur la longueur des roseaux, rajoutait une moitié et réalisait tous les autres rapports: par ses multiples expériences il atteignit une totale certitude'*. Boèce est nettement plus imprécis que Nicomaque sur la distinction entre ces trois expériences, ne prenant aucun risque car sans doute peu confiant dans la perfection de l'analogie entre les marteaux et les cordes.

## Les autres textes

Jamblique, dans la *Vie de Pythagore*, nous offre la relation de l'histoire des marteaux, relativement fidèle à celle de Nicomaque. Jamblique est soucieux de la vraisemblance de l'histoire, et il précise quelques détails pratiques. A propos des marteaux de poids 8 et 9 il dit : *« Il constata que l'intervalle entre la quarte et la quinte était en soi dissonant, mais qu'il pouvait combler la différence de grandeur qui pouvait subsister entre elles »*. En effet, si l'intervalle de seconde n'est pas agréable à l'oreille, il est essentiel pour la construction du système à deux tétracordes disjoints séparés par un ton représenté par le rapport 9/8, et qui est l'objet même de cette expérience. C'est peut-être ici l'explication du cinquième rapport, dissonant, relevé par Boèce dans sa narration. Par ailleurs, Jamblique, esprit pratique, suggère que Pythagore, quittant l'échoppe du forgeron, rentre chez lui, *« Ayant pris des morceaux de métal d'un poids rigoureusement égal à celui des marteau »*. Par contre on peut supposer qu'il n'a pas réalisé l'expérience (mais doit-on vérifier les affirmations du maître vénéré ?), puisqu'il affirme et confirme que les cordes étaient *rigoureusement de longueur égale*. Il est important de noter que les écrits de Jamblique ont été largement diffusés par la suite, sans doute beaucoup plus que ceux de Nicomaque.

Peu avant Boèce, Macrobe nous fait une tout autre relation de cette histoire, légèrement plus romancée, dans son adaptation du livre VI du *De republica* de Cicéron, le *Songe de Scipion*.

Macrobe, *Somnium scipionis*, Livre II, cap 1

[...] Pythagore est le premier des Grecs qui ait attribué aux sphères cette propriété harmonique et obligée, d'après l'invariable régularité du mouvement des choses célestes ; mais il ne lui était pas facile de découvrir la nature des accords et les rapports des sons entre eux. De longues et profondes méditations sur un sujet aussi abstrait ne lui avaient encore rien appris, quand une heureuse occurrence lui offrit ce qui s'était refusé jusqu'alors à ses opiniâtres recherches.

Il passait par hasard devant une forge dont les ouvriers étaient occupés à battre un fer chaud, lorsque ses oreilles furent tout à coup frappées par des sons proportionnels, et dans lesquels la succession du grave à l'aigu était si bien observée, que chacun des deux tons revenait ébranler le nerf auditif à des temps toujours égaux, en sorte qu'il résultait de ces diverses consonances un tout harmonique. Saisissant une occasion qui lui semblait propre à confirmer sa théorie par le sens de l'ouïe et par celui du toucher, il entre dans l'atelier, suit attentivement tous les procédés de l'opération, et note les sons produits par les coups de chaque ouvrier.

Persuadé d'abord que la différence d'intensité de ces sons était l'effet de la différence des forces individuelles, il veut que les forgerons fassent un échange de leurs marteaux ; l'échange fait, les mêmes sons se font entendre sous les coups des mêmes marteaux, mus par des bras différents. Alors toutes ses observations se dirigent sur la pesanteur relative des marteaux ; il prend le poids de ces instruments, et en fait faire d'autres qui diffèrent des premiers, soit en plus, soit en moins mais les sons rendus par les coups des derniers marteaux n'étaient plus semblables à ceux qui s'étaient fait entendre sous le choc des premiers, et ne donnaient que des accords imparfaits.

Pythagore en conclut que les consonances parfaites suivent la loi des poids ; en conséquence, il rassembla les nombreux rapports que peuvent donner des poids inégaux, mais proportionnels, et passa des marteaux. aux cordes sonores.

Il tendit une corde sonore avec des poids différents, et dont le nombre égalait celui des divers marteaux ; l'accord de ces sons répondit à l'espoir que lui avaient donné ses précédentes observations, et offrit de plus cette douceur qui est le propre des corps sonores. Possesseur d'une aussi belle découverte, il put dès lors saisir les rapports des intervalles musicaux, et déterminer, d'après eux, les différents degrés de grosseur, de longueur et de tension de ses cordes, de manière à

ce que le mouvement de vibration imprimé à l'une d'elles pût se communiquer à telle autre éloignée de la première, mais en rapport de consonance avec elle.

Chez Macrobe, on ne parle plus de nombres et de rapports. Le style littéraire l'emporte, et on frise l'in vraisemblance. Macrobe raconte ainsi que Pythagore, non content de procéder à l'échange des marteaux, en fait confectionner d'autres, différents et donc dissonants. La transition entre les trois expériences et les explications des phénomènes sont très succinctes : « *Pythagore en conclut que les consonances parfaites suivent la loi des poids; en conséquence, il rassembla les nombreux rapports que peuvent donner des poids inégaux, mais proportionnels, et passa des marteaux aux cordes sonores* ». Cette version du *Songe de Scipion*, adaptée par Macrobe d'un texte de Cicéron, a été lue et commentée pendant des siècles, eu égard à la réputation du grand orateur.

Les références à cette histoire des marteaux de Pythagore sont très nombreuses, en particulier dans la littérature d'acoustique musicale, plus préoccupée de l'esthétique des intervalles, des gammes et des tempéraments que des lois physiques de production des sons. Citons par exemple Guido d'Arezzo, célèbre théoricien de la musique du XI<sup>ème</sup> siècle, à qui l'on doit la nomenclature des notes de la gamme, dans son ouvrage le plus célèbre, *Micrologus* :

Un certain Pythagore, grand philosophe, voyageait d'aventure ; on arriva à un atelier où l'on frappait sur une enclume à l'aide de cinq marteaux. Etonné de l'agréable harmonie qu'ils produisaient, notre philosophe s'approcha et, croyant tout d'abord que la qualité du son et de l'harmonie résidait dans les différentes mains, il interchangea les marteaux. Cela fait, chaque marteau conservait le son qui lui était propre. Après en avoir retiré un qui était dissonant, il pesa les autres et, chose admirable, par la grâce de Dieu, le premier pesait douze, le second neuf, le troisième huit, le quatrième six de je ne sais quelle unité de poids.

C'est un résumé bref et concis, mais qui au moins ne commet pas l'erreur de la transposition de l'expérience aux cordes tendues...

Voici un exemple de ce qu'on pouvait trouver dans un ouvrage d'harmonie du début du XVII<sup>ème</sup> siècle (Salomon de Caus, *Institution Harmonique*, 1615) :

Celui qui a essayé premièrement à donner quelques proportions aux intervalles, entre les sons graves et aigus, fut (comme dit Macrobe, et après luy Boèce) Pitagoras lequel passant par une rue, où il y avoit une boutique de forgerons qui travailloyent avec leurs marteaux, trouva que lesdits marteaux donnoient en frappant chacun un son différent suivant leur pesanteur; de là trouva les proportions des consonances par le poids desdits marteaux, et après recherche (comme dit le même Boèce) sur un instrument d'une corde (nommé des grecs monochorde) les intervalles qui estoient entre les consonances, et trouva que lesdites consonances estoient formées d'intervalles proportionnés ensemble.

On n'est plus du tout dans la description d'une expérience, mais bien dans l'anecdote destinée à soutenir un discours plutôt dogmatique. Il s'agit ici d'un ouvrage d'enseignement de la théorie musicale.

Plus près de nous, il n'est pas inutile de considérer comment Huygens abordait cette légende. On sait que le grand savant hollandais était également musicien, et qu'il a inventé un clavier de 31 parties par octave afin de résoudre le problème du tempérament idéal, c'est-à-dire respectant la justesse et la contrainte des notes fixes. Dans une pièce manuscrite non datée, il commente l'histoire de Pythagore<sup>34</sup> :

Je veux bien croire que ce fut Pythagore qui s'avisait le premier de faire cette recherche, car il avait l'esprit porté à la recherche des choses naturelles et très beau, non pas toutefois que les marteaux du maréchal lui en aient donné l'occasion car des pièces de fer de la forme qui sert à cela ne sont nullement sonores. Il se peut qu'il ait rencontré des pièces de quelque métal mieux formées pour sonner que les marteaux et qu'il ait remarqué que, de celles qui étaient semblables, les plus grosses sonnaient plus bas. Et il pouvait déterminer par leurs différents poids la proportion des consonances, parce qu'il est vrai que de deux pièces de métal semblables celle qui est double de poids de l'autre lui consonoit de l'octave plus bas et celle qui est sesquialtère en poids fait la quinte en bas et ainsi de suite. Quelques anciens auteurs de même racontent qu'après cela il attachait des poids suivant ces proportions trouvées à des cordes pour les tendre, et qu'il trouva que le poids double tendait la corde à l'octave plus haut, et la sesquialtère à la quinte, ce qui est faux : et si ces auteurs s'étaient donné la peine de faire l'expérience ils auraient trouvé qu'il faut le poids quadruple du premier pour faire monter une corde à l'octave; qu'il faut qu'il soit comme 9 à 4 pour faire la quinte, et qu'universellement la raison des poids doit être double de celle qui détermine les consonances par les parties d'une corde tendue. Si Pythagore a donc aussi examiné les consonances

<sup>34</sup> Christiaan Huygens, Portefeuille 27 (Musica), f. 56, *Œuvres complètes*, Société Hollandaise des Sciences, Nijhoff, La Haye, 1937, tome 19, p 362-363.

par des cordes tendues par des poids différents, il a trouvé la chose comme je viens de dire, mais ce n'est pas d'ici qu'il a établi les proportions des consonances, mais par la division de la corde ou du canon comme ils appelaient cela anciennement.

Comme on le remarque, Huygens sépare bien les deux expériences, il rejoint Pythagore sur les rapports inversement proportionnels entre les poids frappés et les hauteurs de son, il relève bien qu'il n'en est pas de même pour les poids tenseurs qui suivent une loi proportionnelle à leur carré. Huygens avait lu le passage des *Discorsi* de Galilée dans lequel il puise presque mot pour mot.

## **Un contradicteur de Pythagore : Vincenzo Galilei**

Venons-en donc aux Galilei, père et fils, Vincenzo, le père qui, luthiste, a fait l'expérience de la tension des cordes, et Galileo, le fils qui a écrit ce remarquable ouvrage de physique, paru en 1638, les *Discorsi*, mais dont les pages concernant l'acoustique datent probablement d'avant 1610, et qui rendent un hommage posthume aux théories développées par son père.

Vincenzo Galilei (1520-1592) était avant tout musicien, luthiste, et théoricien de la musique. Formé par Zarlino, il entre en conflit avec lui sur la méthode de détermination des degrés de la gamme. Vincenzo fréquente les assemblées de la *Camerata Fiorentina* du comte Bardi qui regroupe alors des poètes, des savants et des amateurs de curiosités intellectuelles. Il est l'auteur de trois ouvrages de théorie musicale.

Dans un traité non publié, et découvert dans les années 1960 par Claude Palisca,<sup>35</sup> probablement écrit vers 1586, Vincenzo Galilei s'intéresse aux différentes façon de produire le *diapason* (l'octave). Il relate une expérience qu'il a effectuée et qui contredit la théorie de Pythagore sur la définition du rapport de proportionnalité simple entre la hauteur de la note et le poids tenseur. Vincenzo n'est pas seulement un théoricien, il est également musicien. Lorsqu'il accorde son luth, il sent, physiquement, la tension exercée sur la corde. Il n'est pas étonnant qu'il ait cherché à vérifier la fable du forgeron, ce qu'aucun savant n'avait pensé à faire auparavant. Il suspend des poids aux cordes à l'extrémité d'un luth, là où elles sont fixées sur les chevilles qui permettent l'accord. Et il constate que pour produire l'octave, il faut non pas doubler le poids, mais le quadrupler. De même, pour produire la quinte (rapport de longueurs de cordes de 2/3), il faut multiplier le poids par 9/4, ce qui exprime bien le carré de l'inverse du rapport de longueur de corde<sup>36</sup>. Ce que fait Vincenzo Galilei ici, c'est réellement une expérience de physique. Il observe la différence de tension qui lui paraît anormalement forte lorsqu'il accorde son luth. Il fait l'expérience des cordes tendues, mesure les poids tenseurs, et conclut à la formulation mathématique de la loi du carré. Vincenzo Galilei est un praticien, un technicien, un artiste disait-on à l'époque. Il est devenu théoricien au contact des savants qu'ils rencontrait, et a pu développer, auprès de ces influences multiples, ce savoir faire et ce savoir penser qui permet à la science de se construire, sur la base à la fois de l'observation, de la quantification, de la théorie et de l'expérience. Dès le début de son *Dialogo* de 1581, contre les aristotéliens, Vincenzo affirme sa préférence pour la connaissance issue d'expérience des sens plutôt que du dogme<sup>37</sup> :

je désire, à propos des choses que la sensation peut atteindre, que soit écartée (comme le dit Aristote dans le huitième livre de sa *Physique*), non seulement l'autorité, mais aussi, la raison biaisée qui récuse comme lui étant contraire ce qu'on voudrait que ce ne soit qu'une vérité apparente, parce qu'il me semble qu'ils se comportent de façon ridicule (pour ne pas dire, comme le philosophe, de façon idiote) les gens qui pour prouver quelque conclusion qui est la leur veulent tout bonnement qu'on y croit sur la simple foi de l'autorité, sans produire les raisons qui la rendraient valides.

Bien sûr nous ne sommes pas encore en présence d'une méthode expérimentale achevée, mais c'est bien chez un musicien que la prééminence de l'expérience des sens sur le dogme s'est manifestée, et ce n'est pas anodin.

Vincenzo Galilei commente ainsi son expérience<sup>38</sup> :

Il existe peu de choses qui ne peuvent être pesées, comptées ou mesurées.

Nous sommes bien ici en présence des principes fondateurs de la méthode expérimentale, la mesure et la quantification. Vincenzo ne refuse pas les mathématiques, mais au lieu de les considérer comme un langage

<sup>35</sup> Vincenzo Galilei, *Discorso intorno alla diversita delle forme del Diapason*, Trad. De C. Palisca : A special discourse concerning the diversity of the ratios of the diapason, in *The Florentine Camerata*, Yale University Press, New Haven, 1988

<sup>36</sup> Vincenzo Galilei, *Discorso...*, Trad. De C. Palisca : *A special discourse concerning the diapason*, in *The Florentine Camerata*, Yale University Press, New Haven, 1988, p 184-185.

<sup>37</sup> Vincenzo Galilei, *Dialogo della musica antica e della moderna*, Florence, 1581, trad. R. Fredette.

<sup>38</sup> Vincenzo Galilei, *Discorso intorno alla diversita delle forme del Diapason*, trad. Palisca, p. 181.

qui permet l'expression de la beauté des nombres et de leurs relations, il les utilise pour traiter des grandeurs préalablement mesurées.

Vincenzo reprendra sa thèse dans son *Discorso* contre Zarlino de 1589, mais ses ouvrages n'ont pas eu un grand retentissement auprès de la communauté scientifique de l'époque, tout au plus intéressaient-ils les théoriciens de la musique alors en pleine élaboration d'un nouveau langage. C'est le fils de Vincenzo, Galileo Galilei, qui reprendra la théorie du carré des poids tenseurs, contre l'opinion courante scolastique teintée de pythagorisme. Au cours des dernières années de la vie de son père, Galileo, âgé d'une vingtaine d'années, s'est attelé aux problèmes des phénomènes périodiques, tant pour les cordes vibrantes que pour les pendules. La légende des lustres de la cathédrale de Pise se situe vers 1583, mais c'est sans doute lors de son retour à Florence, entre 1585 et 1589, qu'il commence sa réflexion sur le mouvement périodique. Nous n'avons aucune donnée sur le rôle joué par son père et ses expériences musicologiques dans l'élaboration des réflexions de Galilée sur les mouvements périodiques. Raymond Fredette, éminent traducteur et spécialiste du *De motu antiquiora*, recueil de manuscrits du jeune Galilée sur le mouvement local, est persuadé de cette influence<sup>39</sup> :

Le père prouve, expériences contrôlées à l'appui, qu'on ne peut pas se fier à la théorie si belle et vénérablement appuyée sur les idées des autorités anciennes les plus prestigieuses, Pythagore, Platon. Que s'est-il passé, nous ne le savons pas vraiment. On pourrait même imaginer de façon tout à fait vraisemblable que c'est le fils, à l'occasion de sa découverte en 1583 de l'isochronisme des petites oscillations du pendule, qui aurait rapporté des résultats d'expériences à la maison et qui aurait influé sur les expérimentations dont on vient de parler. Une chose paraît certaine, cependant, la musique, la sensibilité rythmique acquise auprès du père, ont joué un rôle décisif dans cette découverte du fils.

Galilée n'a rien écrit à cette époque sur le son. On sait qu'il avait l'intention d'entreprendre un *De sono et voce*, par une allusion dans une lettre à Belisario Vinta de 1610. Dans les *Discorsi*, son dernier ouvrage paru en 1638, Galilée consacre une dizaine de pages remarquables sur l'acoustique et les vibrations des cordes. Il est probable qu'il se soit servi de notes, aujourd'hui encore introuvables, rédigées au cours de ces années florentines, avant son départ pour Padoue. Ce long délai, au cours duquel Galilée s'intéresse à tout autre chose, explique sans doute certaines inexactitudes dans la description d'expériences, inexactitudes qui ont conduit certains commentateurs à douter de l'authenticité de ces expériences.

À partir du début du XVII<sup>e</sup> siècle, on ne se sert presque plus de cette histoire des marteaux de Pythagore pour illustrer la loi des rapports d'intervalles, parce que la notion du 'nombre de vibrations dans le même temps' commence à se substituer à la mystique des nombres chère aux pythagoriciens. Galilée cite à de nombreuses reprises l'expression '*numero di vibrazione in medesimo tempo*' dans les *Discorsi*, ce qui signifie bien le 'nombre de vibrations dans le même temps'. On ne parle pas encore de fréquence, mais le concept se précise, et Mersenne utilise le mot 'période' pour expliquer comment, lui, a pu compter ces mouvements en utilisant une corde très longue et peu tendue, à l'inverse de Galilée qui peine à trouver un moyen de représenter ces vibrations. Il y parviendra dans une expérience dont nous parlerons ailleurs, celle des traces laissées par un couteau sur une plaque de laiton.

La référence à la légende de Pythagore ne sera plus invoquée que dans les textes à caractère historique, à l'occasion de l'exposé des différentes théories sur les intervalles. On notera que pendant longtemps, en particulier au XIX<sup>e</sup> siècle, on attribue à Montucla la découverte de l'erreur de Pythagore concernant le rapport de poids proportionnel au lieu de quadratique<sup>40</sup>. On sait maintenant qu'il faut rendre à Vincenzo Galilei cette correction, reprise par son fils, puis par Huygens.

Après avoir présenté cette approche numérique de la 'division du canon', par les différentes versions de la légende des marteaux de Pythagore, passons maintenant à l'interprétation de la démarche des pythagoriciens.

## **L'analyse des expériences**

Pour une meilleure compréhension, on considérera à présent dans cette étude cette anecdote comme authentique et on nommera donc l'expérimentateur 'Pythagore', même si, on le verra, il est probable que cette expérience ait été effectuée bien après lui. On sait combien Pythagore était mathématicien avant tout, et que son approche de la description et de la compréhension de la nature est d'abord numérique. La description du son est

<sup>39</sup> Raymond Fredette, *D'où vient l'antiaristotélisme de Galileo Galilei*, Note de recherche, CRIST, Univ. Du Québec, Montréal, 2002, p 28. Cette intuition que Galilée a pu élaborer sa théorie des mouvements périodiques auprès de son père Vincenzo, en travaillant sur les cordes vibrantes est partagée également par Thomas B. Settle, ami de R. Fredette, dans 'A Reflection on Galileo's Early Empirical Sense', Paper presented at the XXth International Congress of History of Science, Liège, 20-26 July 1997. Ces commentaires sont extraits d'une correspondance que j'ai eue avec Raymond Fredette au cours de l'année 2005-2006.

<sup>40</sup> Montucla, *Histoire des Mathématiques*, Agasse, Paris, 1799, t 1, p.126.

rendue délicate par sa fugacité, et les phénomènes observables sont limités. Le terrain d'observation est constitué : de la voix humaine, mais tellement changeante d'un individu à l'autre et tellement inconstante ; des sons de la nature ensuite, le bruit du vent, des ruissellements, et surtout le tonnerre, le plus grand bruit sans doute jamais entendu ; enfin des sons artificiels, produits par l'activité humaine, mais difficiles à observer et à reproduire. Alors Pythagore utilise un instrument de musique à cordes, la lyre, sans doute. Les sons sont reproductibles, suffisamment durables et leur hauteur correspond à des longueurs mesurables avec une règle, ainsi qu'à des tensions, également mesurables par les poids. Il a également utilisé des flûtes et des aulos (genre de hautbois), mais les intervalles sont déterminés par les trous et sont difficilement modifiables. Pythagore n'a pas inventé le principe de réglage de la hauteur des sons par modification de la longueur de cordes et de la tension. Les instruments de musique existaient bien avant lui et les luthiers et les musiciens savaient parfaitement comment les accorder en jouant sur la tension, et comment, en appliquant ses doigts on raccourcit la corde et on élève le son. Le système alors en vigueur est l'heptacorde, c'est-à-dire deux tétracordes joints qui forment chacun une quarte, et dont les deux cordes intermédiaires sont laissées à l'appréciation du musicien. On accorde les quarte au moyen des battements, tout comme sur une guitare de nos jours, également accordée par quartes. Tout ceci est largement connu, mais ce savoir empirique ne repose pas sur une connaissance de la relation de cause à effet, elle est intuitive. Pythagore va introduire le nombre dans ce savoir-faire, par une méthode de mesure systématique.

Le son est un phénomène difficile à étudier, essentiellement parce qu'il ne laisse pas de trace. L'approche mathématique des objets sonores, telle que Pythagore l'envisage, nécessite un certain nombre de préalables. Une telle approche repose sur la mesure de paramètres, et concernant le son, la hauteur, l'intensité, la durée, le timbre. La problématique de l'étude des sons repose donc sur la définition de grandeurs mesurables affectées à ces différentes caractéristiques. Pour définir des grandeurs caractéristiques dans le but de les mesurer, il est nécessaire d'établir des classes d'objets, c'est-à-dire de comparer, et de réunir des sons, identiques en tout point à l'exception de la caractéristique à observer. Cette démarche, décrite ici avec un langage du XX<sup>ème</sup> siècle, Pythagore l'adopte, même si elle n'est pas explicitée. L'histoire de la physique est une succession de tentatives de définir ces classes d'objets qui permettent de mesurer les grandeurs à observer. Lorsqu'il s'agit de phénomènes visibles et durables, telles que la caractérisation d'objets par la forme, la couleur ou les dimensions, il est aisé de procéder aux observations, de façon visuelle ou tactile. Le travail du mathématicien consiste alors à définir des formes et des méthodes de mesure par comparaison avec des références constituées par la nomenclature des formes (rond, carré, triangle, puis rectangle, coniques, etc.), et la définition d'une longueur étalon. C'est l'objet de la géométrie, aidée par l'arithmétique lorsqu'il est nécessaire de composer ces grandeurs, après leur mesure.

Dans le cas de l'étude des sons, la première démarche consiste donc à établir des classes de sons, selon leurs caractéristiques, et c'est ici que la difficulté apparaît. La première grandeur à définir, et sans doute la plus accessible, serait l'intensité. Mais elle est difficilement mesurable. En effet, l'intensité sonore est une grandeur trop variable, dans l'espace et dans le temps, et sa perception est sujette à la subjectivité. Le timbre, qu'on appelle parfois la couleur du son, peut être défini par comparaison avec des sons connus, comme ceux des instruments de musique, ou plus simplement par les éléments simples du langage. Mais cette grandeur échappe à toute méthode de mesure fiable. Reste donc la hauteur. Parce qu'elle peut être rendue constante et indépendante des autres caractéristiques, elle constitue une grandeur mesurable. Pour cela il est nécessaire de construire une méthode fiable et un instrument propre à produire des sons de hauteurs différentes mais stables, d'une durée suffisamment longue pour en permettre l'observation, et comparable avec un son de hauteur constante, qui sert de référence. La seconde condition est que cet instrument établisse une relation bijective entre d'une part l'ensemble des hauteurs de notes et d'autre part un ensemble de grandeurs mesurables. Voyons maintenant comment Pythagore a élaboré une méthode et un instrument pour parvenir à cette mesure.

Pythagore est frappé par la perfection naturelle des consonances qui reposent sur des rapports de nombres entiers. Ces nombres entiers sont 1 pour l'unisson, 2 pour l'octave ( $1/2$  pour la longueur de corde), 3 pour la quinte (qui, ramenée dans une octave, correspond à  $3/2$ , et donc à  $2/3$  pour la longueur de la corde correspondant à cette note), 3 encore pour la quarte, mais en rapport inverse ( $4/3$  donc  $3/4$  pour la longueur de corde), enfin 4 pour la double octave et bien entendu les multiples de ces grandeurs, qui correspondent aux octaves successives. Le nombre 5 qui détermine le rapport de tierce naturelle ( $4/5$ ) n'est pas utilisé par Pythagore, ni le 7 qui semble-t-il est un chiffre magique et sacré. La méthode est celle des épimores, c'est-à-dire d'établir des rapports constitués d'un tout plus une fraction dont le numérateur est égal au dénominateur augmenté de 1 (nous dirions  $1 + 1/n$ ). L'utilisation conjointe de la série de la *tetractys* (1, 2, 3, 4, dont la somme fait 10) et des rapports épimores, produits les rapports d'intervalles qui constituent le système pythagoricien : 1,  $1/2$  (octave),  $2/3$  (quinte),  $3/4$  (quarte). Cette démarche de construction des éléments de base de la musique par la détermination des intervalles puis par la construction des gammes, se poursuivra pendant plus de vingt



siècles, avec ses ruptures, ses dogmes et ses variantes culturelles<sup>41</sup>. Encore une fois, ces rapports ne sont pas choisis parce qu'ils sont 'beaux', mais parce qu'ils correspondent aux consonances naturelles, produites par la présence des harmoniques 2 et 3 dans un son quelconque, et qui donc 'résonnent' agréablement à l'oreille.

## Les nombres de Pythagore

Avant Pythagore, la musique ne se préoccupe pas de nombres. L'intervalle de base est constitué par le tétracorde qui couvre un intervalle de quarte, qu'on nomme à l'époque épitrite. Une quarte, le diatessaron, c'est l'intervalle do-fa de notre notation, c'est le rapport sesquiterce tel qu'on le définit, c'est-à-dire une unité plus son tiers, ou encore le rapport  $4/3$ . Le système pré-pythagoricien, c'est l'assemblage de deux quartes successives avec une corde commune (un heptacorde, donc), c'est-à-dire do-fa-sib, ou encore un rapport total de  $4/3 \times 4/3 = 16/9$ . Ce système, fondé sur le plus petit intervalle consonant, convient à l'esthétique de l'époque, mais pas à la perfection mathématique exigée par les pythagoriciens. Ceux-ci veulent que la note la plus grave (hypate) soit en consonance d'octave avec la note la plus aiguë (nète), donc correspondant à un rapport total de 2, tout en conservant des intervalles consonants de quarte. Or, il faut bien comprendre qu'une quarte, c'est également une quinte. Mathématiquement, une quarte,  $4/3$ , est équivalente à  $2/3$ , puisque les rapports des deux sons étant à l'octave, ils produisent la même note. Or, une quinte, c'est  $3/2$ , c'est-à-dire l'inverse d'une quarte  $4/3$ . Et en effet, do1-fa1, c'est une quarte, et fa1-do2, c'est une quinte. Une octave, do1-do2, c'est donc un assemblage d'une quarte et d'une quinte, ou d'une quinte et d'une quarte. Un tel assemblage, dans notre langage mathématique, c'est un produit de rapports. L'assemblage d'une quarte et d'une quinte, c'est  $4/3 \times 3/2$  égal à 2, donc à une octave, et c'est commutatif. Mais une quinte, c'est une quarte 'plus' un petit intervalle tel que deux quartes assemblées 'plus' cet intervalle fasse une octave. Si l'on cherche le rapport  $p/q$ , tel que  $4/3 \times 4/3 \times p/q = 2$ , la solution est  $p/q = 9/8$ .

La révélation des pythagoriciens, c'est de promouvoir un assemblage de deux quartes séparées par un intervalle de  $9/8$ , dont la 'somme' fait 2, et dont les 'sommés' imbriqués font des quintes de rapport  $3/2$ . Le tout doit être réalisé avec des nombres entiers...

Les quatre nombres les plus simples qui répondent à ces conditions sont la combinaison 6, 8, 9, 12. En effet, 6 et 8 d'une part, et 9 et 12 d'autre part, sont en rapport sesquiterce ( $4/3$ , épitrite ou diatessaron) et forment des quartes ; 6 et 9, d'une part, et 8 et 12 d'autre part, sont en rapport sesquialtère ( $3/2$ , hémiole ou diapente) et forment des quintes ; et 6 et 12 sont en rapport double ( $2/1$ , octave ou diapason). Le rapport restant est dit sesquioctave ( $9/8$ , qui forme le 'ton'). Ces arrangements de rapports constituent la véritable invention de Pythagore. Dès lors, l'heptacorde fait place à l'octacorde composé de deux tétracordes séparés par un ton égal à un intervalle de  $9/8$ .

La détermination des intervalles contenus dans la quarte va occuper pendant plusieurs siècles la communauté des mathématiciens et des musiciens, et susciter de nombreuses polémiques<sup>42</sup>. La légende des marteaux consiste à établir la légitimité de l'octacorde : une succession de nombres qui construisent cette nouvelle combinaison, pythagoricienne, d'une octave composée d'un assemblage de deux quartes et d'un ton, ou d'une quarte et d'une quinte. Cette succession est caractérisée par les nombres 6, 8, 9, 12, associés soit à des poids sonnants, soit à des poids tenseurs, soit à des longueurs de cordes, ou encore aux longueurs de tuyaux<sup>43</sup>.

## La première expérience : les poids sonnants

Revenons alors au texte de Boèce, référence dans la littérature musicologique, relatant les expériences de Pythagore. Il observe les sons produits par les marteaux et constate qu'ils rendent des sons de hauteurs différentes. Dans un premier temps il élimine la composante humaine entachée de subjectivité, c'est-à-dire la force de frappe, et pour cela procède à l'échange des manipulateurs. Il constate alors que les différences sont exclusivement causées par les différences des marteaux. Ils ne diffèrent que par leurs masses, c'est donc la

<sup>41</sup> On attribue souvent à Pythagore la construction du système de 12 quintes successives qui construisent la gamme occidentale moderne. C'est beaucoup plus tard, d'abord avec Platon (Timée), puis avec la division du canon (attribuée à Euclide), et surtout avec Ptolémée (Harmoniques) au Ier siècle, que s'élabore lentement cette construction, en rapport avec la construction des différents genres (diatonique, chromatique, enharmonique...).

<sup>42</sup> On classe les différentes méthodes de détermination des intervalles contenus dans la quarte en genres : diatonique, chromatique et enharmonique. On comptera plus d'une vingtaine de façons d'organiser ces sons à l'époque de Ptolémée (Ier siècle). Ces modes, et les controverses qu'ils suscitent, ont alimenté une littérature abondante jusqu'à nos jours.

<sup>43</sup> Les spécialistes de la théorie musicale de l'Antiquité pensent aujourd'hui que l'heptacorde a subsisté longtemps et que ce serait Philolaos, disciple de Pythagore, qui serait en fait l'inventeur des deux tétracordes disjoints et de l'intervalle  $9/8$  (le ton). Paul Tannery qui conteste l'authenticité des 'fragments philolaïques', suggère qu'il s'agit plutôt d'Archytas, disciple de Philolaos et théoricien de l'acoustique, contemporain de Platon.

grandeur caractéristique, qui induit la différence de hauteur de sons. Pythagore ne cherche pas à comprendre pourquoi la masse détermine la hauteur du son, il constate seulement la relation. Rentré chez lui, il ne poursuit pas dans cette voie, celle des poids des corps sonnants, mais transpose l'expérience sur les cordes tendues, dans un premier temps avec des poids équivalents à ceux du forgeron, et ensuite avec un poids tenseur unique et constant et des longueurs de cordes différentes. Si on se réfère à la cohérence de l'histoire, on peut penser que manipuler des poids différents est peu pratique, et que la pesée est une opération complexe (d'ailleurs on n'en parle pas dans la légende). Si on considère que cette histoire n'est qu'une illustration destinée à faire sentir la différence physique par des poids censés être plus accessibles à la sensation que les longueurs de cordes, alors pourquoi pas. Sauf que l'expérience sensible de tout musicien montre que l'histoire des poids ne peut pas fonctionner, puisque intuitivement on sent bien que les poids les plus grands doivent sonner plus grave, alors que lorsqu'ils tendent la corde, ils la font sonner plus aigu. Cette incohérence aurait dû sauter aux yeux de tous, y compris de Galilée père, avant même de mesurer les rapports de poids qui, en effet, ne suivent pas la proportionnalité simple mais quadratique.

Car si on observe seulement les sons produits par les marteaux — on ne sait pas bien ce qui les rend sonores — rien n'indique que la légende soit fausse, sur le plan des rapports de poids et Huygens l'avait bien relevé. Cependant Huygens nous dit que les marteaux ne sonnent pas :

[...] des pièces de fer de la forme qui sert à cela [les marteaux] ne sont nullement sonores. Il se peut qu'il ait rencontré des pièces de quelque métal mieux formées pour sonner que les marteaux et qu'il ait remarqué que, de celles qui étaient semblables, les plus grosses sonnaient plus bas.

Les recherches qu'on a pu faire sur les marteaux en usage dans l'antiquité montrent qu'ils étaient de formes très diverses, et pas du tout comme les outils modernes.

Au XIX<sup>ème</sup> siècle, Fétis reprend cet argument avec autorité (il est coutumier de la méthode..) dans sa biographie des musiciens. Selon lui ce n'est pas le marteau qui sonne, mais l'enclume. Ce qui est faux car les deux entrent en vibration et produisent un son. Par ailleurs l'enclume est plus massive, donc plus inerte.

Les marteaux sont des masses de métal moulées. Il est probable que le moule servant à fabriquer ces marteaux soit unique, de forme oblongue, et que le poids est déterminé par la longueur du métal coulé dans ce moule. Alors, si ces marteaux sont de forme parallélépipédiques ou cylindrique, de forme allongée, on les considère comme des barreaux, et les lois de l'acoustique qui s'appliquent sont celles de la vibration des tiges, c'est-à-dire qu'ils vibrent selon plusieurs modes (transversal, de flexion, de torsion et longitudinal) à des fréquences propres différentes. Lorsque la forme est allongée, le mode longitudinal est prédominant et la fréquence des vibrations selon ce mode est déterminée de façon analogue à celle des tubes<sup>44</sup>, c'est-à-dire que la fréquence est inversement proportionnelle à la longueur, à masse spécifique constante, et pour une raideur (grandeur analogue à la tension des cordes) constante. On observe très bien ce phénomène dans les instruments de musique à percussion composés de lames ou de tiges métalliques, tels que les métallophones, vibraphones, xylophones ou autres instruments orientaux. Parmi les disciples de Pythagore, Hippase aurait confectionné une série de quatre disques de bronze de diamètre égal et d'épaisseur variable qui sonnaient lorsqu'on les frappait dans les rapports consonants de quarte, de quinte et d'octave. Cette expérience aurait fourni à Glaucos de Rhegium l'idée d'en faire un instrument de musique<sup>45</sup>.

On peut noter par ailleurs une remarque de A.-J.-H. Vincent, en 1847, à propos de ces fameux marteaux<sup>46</sup> :

[.., l'outil] qu'il désigne, non par le mot σφύρα, marteau, comme on l'a voulu d'abord et comme ensuite on l'a dit et répété dans toutes les langues, mais par σφαίρα, corps sphérique, ce qui ne saurait plus signifier autre chose que le corps forgé, soit globe, soit vase sphérique. Et alors il devient parfaitement exact d'attribuer les différentes intonations des sons rendus à la différence des dimensions de ce vase qui est ici le véritable corps vibrant et par conséquent sonore. [..]

<sup>44</sup> Les vibrations selon le mode longitudinal sont analogues aux vibrations produites dans les tubes, c'est-à-dire qu'elles provoquent l'apparition d'ondes stationnaires dont la disposition dépend des ouvertures des extrémités. Et la loi de Taylor applicable aux cordes vibrantes est analogue à celle de Bernoulli pour les tubes. La tension des cordes est l'équivalent de la raideur. La fréquence est inversement proportionnelle à la longueur, comme pour les cordes. Dans le cas des tiges, lorsque la fixation est au centre, les ondes stationnaires se forment avec un nœud au centre. et il n'y a pas d'harmoniques paires.

<sup>45</sup> H. Diels, *Fragmente der Vorsokratiker*, Berlin, 1903, trad. Daniel Delattre, Gallimard, Paris, 1988, p 79.

<sup>46</sup> A.J.H Vincent, Notices et extraits des manuscrits de la Bibliothèque du roi et autres bibliothèques t XVI, 1847, p 267, cité par C.E. Ruelle, *Etude sur Aristoxène et son école*, Revue d'Archéologie, vol. XIV, 1857, p.418.

D'après Raoul Rochette, certains vases portent le nom de σφίρα au lieu de σφαίρα, ce qui vient encore confirmer cette manière de voir.

Quoi qu'il en soit, il n'est donc pas interdit de penser que Pythagore ne s'est pas trompé sur la proportionnalité entre les hauteurs de notes et les poids des marteaux (eux-mêmes proportionnels à la longueur), ou des corps sphériques de M. Vincent. Mais, et c'est essentiel, dans le sens où le marteau le plus lourd produit bien l'octave, mais *en dessous* du marteau le plus léger. Alors en effet, les deux intermédiaires produisent bien la quarte et la quinte, et entre eux le ton. Par contre l'effet est inverse lorsque les poids sont tenseurs : alors le poids le plus grand détermine la note la plus aiguë. La première 'erreur' de Pythagore n'est donc pas dans la relation entre poids et hauteur, mais dans le sens de la relation. Cette 'erreur' prend forme lors de la transposition de cette expérience à la tension des cordes. Dans son *Etude sur le Timée* de Platon, parue en 1844, Thomas Henri Martin relève cette inversion d'échelle et tente d'en trouver la raison. Dans la plupart des cas les nombres représentant les sons sont grands pour les sons graves, que ce soit dans les cordes tendues, les flûtes ou les marteaux. Ces nombres sont en effet associés à des grandeurs qui sont proportionnelles à la période (ou inversement à la fréquence). Cependant, à partir de Platon, et sans doute antérieurement, on associe les nombres à la hauteur, par analogie avec la vitesse du 'phénomène', grandeur qui détermine la hauteur du son selon les théories de l'époque<sup>47</sup> :

De quelle nature étaient, suivant eux [les pythagoriciens] et Platon, ces quantités représentées en musique par les nombres ? D'après les témoignages de Porphyre, de Théon de Smyrne, de Plutarque et du platonicien Elien, commentateur du Timée, dont Porphyre cite un fragment, et d'après le Timée même, ces quantités, d'autant plus fortes que le son était plus aigu, étaient considérées par eux comme étant les vitesses des impulsions de l'air transmises à travers ce fluide depuis l'instrument musical jusqu'à l'oreille.

Même si T.-H. Martin anticipe un peu lorsqu'il parle de 'vitesse des impulsions de l'air' (les Anciens n'évoquent que la 'vitesse' d'on ne sait pas bien quoi), on voit bien la contradiction devant laquelle se trouvaient nos auteurs. Les lois naturelles associaient les grandeurs aux sons graves, et la loi qu'ils élaboraient sur la propagation des sons impliquait le contraire. En effet, on définit le rapport de quarte comme 4/3, et l'octave supérieure comme rapport double. Double de quoi ? pas des cordes ni des flûtes, en tout cas, qui ne mesurent que la moitié. Cette représentation de la hauteur des sons, grandeur des nombres associée à l'acuité, va s'étendre à la spatialité de l'échelle des sons, le haut pour l'aigu, le bas pour le grave. Cette représentation, toute arbitraire, trouve peut être son inspiration dans l'idée que les sons aigus viennent de la tête, et les sons graves du corps. On comprend la tentation de choisir la tension des cordes comme paramètre, ce qui permet de se conformer au modèle intuitif et de légitimer le rapport direct entre hauteur de son et grandeur numérique. Cette préoccupation de hiérarchisation des hauteurs de son, avec l'aigu en haut, est probablement tardive, ce qui corrobore la théorie d'une écriture récente (Ier siècle) du texte sur les marteaux de Pythagore.

Il était donc important pour nos auteurs de réaliser deux expériences aux résultats inversés, mais dont les lois sont conservées. Il y a une cohérence dans cette obstination apparente de trouver une loi qui associe des quantités aux hauteurs de son de façon directe, et l'expérience des poids tenseurs le permet. Néanmoins l'absence de transition explicative entre les deux expériences introduit une confusion qui a permis aux hauteurs modernes de reléguer cette théorie au rang des anecdotes sans fondement. Cette transition est plus ou moins évasive selon les auteurs et nous allons l'étudier à présent.

Boèce conclut l'exposé sur les poids par « *Pythagore fut le premier à découvrir de cette façon-là la proportionnalité qui fonde cette concorde de sons* ». Si on s'en tient là, c'est exact. Boèce passe alors à un autre paragraphe pour décrire l'expérience du monocorde. Et là, il n'est pas très clair, il évoque les tentatives avec des poids suspendus ainsi qu'avec des récipients remplis d'eau, mais il ne détaille que celle des longueurs de cordes. A-t-il remarqué la contradiction entre les marteaux sonnants et ceux qui tendent les cordes ? Il n'en dit mot.

Par contre il établit bien la proportionnalité des hauteurs de sons avec les nombres 6, 8, 9, 12, qui représentent le fondement de la théorie de Pythagore concernant la constitution de l'octave par un système d'une quarte et d'une quinte elle-même formée d'une quarte et d'un intervalle de 9/8. Boèce cite cette combinaison de nombres comme un exemple, alors qu'elle est unique (avec leurs multiples), si on exige que les nombres soient des entiers.

## La deuxième expérience : les poids tenseurs

Nicomaque est beaucoup plus clair quant à la démarche de Pythagore construisant son nouveau système basé sur l'octacorde, à partir de l'heptacorde ancien, manifestement imparfait. C'est d'ailleurs l'objet de sa

<sup>47</sup> Thomas-Henri Martin, *Etudes sur le Timée de Platon*, Paris 1844, p 391-392.

démarche d'illustration avec l'histoire des marteaux. Par contre sa relation de l'expérience des cordes tendues à un clou par des poids équivalents à ceux de la forge est apparemment fantaisiste. On ne sait pas quels sont les poids lourds et ceux qui font les notes élevées. La parfaite symétrie du système, et sa commutativité, font qu'il fonctionne sans qu'on ait besoin de spécifier le sens. D'un point de vue mathématique cela fonctionne, mais d'un point de vue physique c'est très fâcheux, puisqu'on ne sait toujours pas si les poids de 12 font un son aigu ou grave, certes on le suppose... Mais qu'importe, l'essentiel est que la démonstration est faite : on peut associer des nombres à des hauteurs de sons (Nicomaque est pythagoricien...), même si on ne sait pas à quoi ces nombres correspondent, et une méthode de mesure est établie, rigoureuse et exacte.

Par ailleurs, on peut se demander si le texte n'a pas été manipulé au cours de sa transmission. En effet, Nicomaque nous explique, à propos de la seconde expérience : « *Il suspendit à ce clou quatre cordes semblables par la substance, le nombre des fils, la grosseur, la torsion, et fit supporter à chacune d'elles un poids qu'il fixa à son extrémité inférieure. De plus, il rendit les longueurs des cordes de tout point égales, [...]* »<sup>48</sup>. Ces cordes sont identiques, mais ce 'de tout point égales' laisse perplexe. On ne sait pas bien à quoi elles sont égales, et si elles sont égales entre elles. Les commentateurs le supposent, mais il y a peut-être là un problème d'interprétation. En effet, en supposant les cordes de longueurs inégales, dans un rapport de  $1/\sqrt{k}$  pour  $k$  qui représente le rapport des poids tenseurs, on retrouve la proportionnalité entre les poids et les hauteurs de notes, et c'est essentiel car c'est peut être là que Pythagore va chercher la cohérence de son système. Car par la suite, au paragraphe suivant, Nicomaque nous dit : « *La plus grande corde, comparée avec celle qui venait après la plus petite et qui représentait 8 poids, sonnait la quinte, et il établit qu'elles étaient dans le rapport sesquitiens, ce qui était aussi le rapport des poids entre eux* ». Outre l'erreur sur la nature du rapport qui n'est pas sesquitiens ( $4/3$ ), mais sesquialtère ( $3/2$ ) entre 8 et 12, Nicomaque nous parle bien de cordes *plus grande* et *plus petite*, expression qu'il reprend plus loin. Le traducteur C.-E. Ruelle nous dit en note qu'il s'agit là d'une forme elliptique, et que Nicomaque voulait en fait dire 'la corde tendue par le poids le plus grand'. Mais si les cordes étaient réellement inégales, et dans une proportion déterminée ? Nous tenterons, dans un autre chapitre, d'évaluer cette hypothèse inédite.

### La troisième expérience : le monocorde

Pythagore tente donc, à son retour chez lui, plusieurs expériences, avec des poids suspendus, des vases remplis d'eau, et des cordes tendues. L'expérience la plus efficace, parce qu'elle permet une mesure immédiate par comparaison avec un roseau de longueur déterminée, c'est l'expérience de la corde, tendue par un poids constant, et dont la longueur est variable. Pour cela, Pythagore invente un instrument. Sur une planchette, une corde est tendue entre un point fixe et un arrêt. A cette corde est attaché un poids. Entre la corde et la surface du support, on place un chevalet mobile, qui tend la corde et crée deux segments tendus par le même poids. Si on pince la corde, elle vibre et émet un son d'une certaine hauteur. On mesure la distance entre le point fixe et le chevalet pour chaque hauteur de son considérée, et on compare, d'une part cette longueur avec celle de la corde entière, d'autre part le son émis avec celui de la corde entière. Cet instrument, le monocorde, sera utilisé dans les mesures de hauteur du son jusqu'au XIX<sup>ème</sup> siècle. Nous assistons donc ici à la conception de la première représentation d'un paramètre du phénomène sonore, l'analogie entre la hauteur du son et la longueur d'un segment de droite.

Il s'agit d'une construction analogique simple entre deux ensembles qui n'ont a priori rien de commun, d'une part les sons envisagés selon leur hauteur, et d'autre part un segment de droite mesurable, qu'on va diviser en intervalles. Mesurer un segment de droite est une pratique courante au VI<sup>ème</sup> siècle av. J.-C., en usage dans de nombreux actes de commerce ou d'arpentage. Diviser ce segment en intervalles est également une pratique courante. Mais composer ces intervalles constitue une difficulté qui demande une certaine abstraction.

La composition des intervalles ou, si l'on veut, la détermination de la quinte d'une quinte, suppose une opération de multiplication de rapports, processus qui ne fait pas partie des opérations arithmétiques simples à l'époque de Pythagore. L'analogie avec les sons permet à la fois une représentation du phénomène sonore de façon visuelle, mais également une représentation perceptible, par l'audition, de l'opération abstraite de composition de rapports. Pour cette raison, la division du monocorde aura un grand succès auprès des mathématiciens grecs, et la musique, étude des proportions arithmétiques selon la définition des anciens, fera son entrée dans l'univers des mathématiques, grâce notamment à Euclide.

<sup>48</sup> Nicomaque de Gerasse, *Manuel d'harmonique et autres textes relatifs à la musique*, Trad. C.-E. Ruelle, in 'Collection des auteurs grecs relatifs à la musique', Baur, Paris, 1881.

On dit que Pythagore, sur son lit de mort, aurait enjoint ses disciples d'utiliser le monocorde<sup>49</sup>. Il semble qu'une controverse agitate la secte à ce sujet. On a vu que le problème de la représentation de la hauteur des sons consistait dans l'impossibilité pratique de trouver une loi directe entre dimensions des corps sonores et nombres correspondants. En effet, les pythagoriciens voulaient que les nombres élevés correspondent aux sons aigus, et inversement pour les graves. Le système musical de Pythagore repose d'une part sur l'utilisation des 4 nombres de la *tetractys* (1, 2, 3, 4), et d'autre part sur des rapports épimores de la forme  $n + 1 / n$ . Les degrés qui délimitent ces rapports sont donc représentés par des nombres plus grand que l'unité pour des sons plus aigus. Les lois naturelles sont inverses, que ce soit pour les flûtes, les vases ou les longueurs de cordes qui sonnent d'autant plus graves que leurs dimensions s'accroissent. Lorsque les successeurs de Pythagore, et notamment Archytas, ont cherché une représentation des nombres en relation avec les degrés, ils ont tenté d'utiliser une méthode qui conserve le caractère direct de la représentation. Par ailleurs Archytas associait la hauteur des sons à la vitesse du mouvement, les sons aigus sont rapides, les sons graves lents. C'est à cette époque que, selon Théon de Smyrne, Lasos et Hippase ont fait des expériences avec des vases<sup>50</sup> :

On raconte que Lasos d'Hermione et les disciples d'Hippase de Métamonte, ce dernier de la secte de Pythagore, ont observé sur des vases la rapidité et la lenteur des mouvements à l'aide desquels les consonances se calculent en nombres. Prenant plusieurs vases de même capacité et semblables, on a laissé l'un vide et l'on a rempli l'autre à moitié d'un liquide, puis on a frappé chacun d'eux, on a obtenu la consonance d'octave. Laissant de nouveau un vase vide et remplissant l'autre au quart, on a obtenu, en les frappant, la consonance de quarte : pour l'accord de quinte, on remplissait le tiers d'un vase : le rapport des espaces vides était, pour l'octave celui de 2 à 1, pour la quinte celui de 3 à 2, pour la quarte celui de 4 à 3.

Il existe au moins deux façons d'obtenir des sons avec des vases plus ou moins remplis. La première est celle qui est décrite, on frappe sur le verre. Dans ce cas, le vase rempli sonne plus grave, et s'il est rempli à moitié, on obtient un intervalle faible, de l'ordre du ton, et pas une octave. Le texte relate donc une inexactitude sur ce point. Par contre, si on souffle sur le bord, comme sur le goulot d'une bouteille, alors on obtient le résultat proposé. Dans le premier cas c'est la structure qui vibre, avec une élasticité variable, dans le second, c'est la colonne d'air qui produit le son, comme dans une flûte, et on observe bien la relation décrite. On peut également frotter son doigt mouillé sur le bord, mais il s'agit d'une autre expérience..

Quoi qu'il en soit, cette méthode avait l'avantage de conserver, du moins apparemment, la relation directe entre nombre et hauteur de son. On peut disposer les différentes colonnes d'eau côte à côte et ainsi représenter les intervalles. Cependant les rapports sont différents de ceux recherchés (1/4 pour la quarte, 1/3 pour la quinte), et le but recherché n'est pas atteint.

Alors on comprend pourquoi ces pythagoriciens ont tenté l'expérience des poids tenseurs sur des cordes. Cette méthode conserve le sens direct de l'association, et de plus elle reproduit la relation entre rapports de poids et rapports d'intervalles. De plus, la notion de poids associé à un mouvement convient bien aux théories de la mécanique alors en usage, les corps tombent d'autant plus vite qu'ils sont lourds, ce qui permet une analogie supplémentaire avec la vitesse du mouvement sonore.

Malheureusement, on l'a vu, dans ce cas les longueurs de cordes ne peuvent pas être égales..Ce qui a forcément induit une tentative de trouver une loi de longueur qui satisfasse à cette condition.

Il semble que le choix de cette représentation associant nombre et hauteur de son ait été l'objet d'une controverse, et Platon y a sans doute pris parti, comme l'évoque Théon de Smyrne.

La tentative d'associer directement la tension, et donc les poids, avec la hauteur de note était problématique et la raison platonicienne l'a emporté sur l'intuition physique. Il fallait donc se résoudre à utiliser la longueur des cordes, au prix d'une opération mathématique inélégante, l'inversion du rapport. C'est donc ce procédé que préconisait Pythagore à la fin de sa vie, et ce n'est sans doute pas lui, encore une fois, qui l'expérimenta, comme le raconte Théon de Smyrne, qui relate<sup>51</sup> :

Par la division des cordes, on obtient les mêmes rapports, comme nous l'avons vu. Toutefois on ne se servait pas d'une seule corde, comme dans le canon harmonique, mais de deux cordes à l'unisson également tendues. On interceptait la moitié d'une de ces cordes en pressant le

<sup>49</sup> Aristide Quintilien, *La musique*, trad. François Duysinx, Ed. Bibl. Fac. Philo et lettres, Université de Liège, 1999, p 181. Il est probable que le terme utilisé n'est pas 'monocorde' puisqu'il en comprenait deux. Environ six siècles séparent Pythagore de Quintilien.

<sup>50</sup> Theon de Smyrne, *Exposition des connaissances mathématiques utiles pour la lecture de Platon*, traduction du grec au français J. Dupuis, Paris, Hachette, 1892, p 97.

<sup>51</sup> *Idem*, p.99.

milieu avec le doigt, on obtenait avec la moitié et l'autre corde entière la consonance d'octave ; quand on interceptait seulement un tiers, les deux autres tiers et la corde entière donnaient l'accord de quinte. De même pour obtenir la consonance de quarte, on interceptait le quart d'une des deux cordes, en laissant l'autre entière.

Le monocorde pythagoricien est donc l'ancêtre du canon, à une seule corde, qu'on attribue souvent à Euclide.

La *Division du canon* est probablement le premier traité qui indique précisément l'utilisation de l'instrument, donc sans doute le texte fondateur du monocorde. Attribué à Euclide, mais sans doute d'un auteur antérieur, peut-être Eudoxe (selon Paul Tannery), ou Cléonide (selon des auteurs plus récents). Le texte est pédagogique et se comprend en liaison avec les ouvrages traitant des rapports, et notamment le chapitre V des *Elements* d'Euclide<sup>52</sup>. Il est essentiellement théorique et présente la construction des différents intervalles ainsi que les définitions des notions qui lui sont nécessaires.

Avec Ptolémée, qui commente longuement la *Division du Canon*, on assiste à l'élaboration de l'instrument qui permet d'établir les rapports recherchés sans risque d'erreur. Dans les *Harmoniques*, Ptolémée décrit l'Hélikon, sorte de gabarit permettant la construction, au moyen de triangles rectangles homothétiques, des longueurs correspondant aux intervalles de quarte, de quinte d'octave et de ton. Et on retrouve ici les nombres 6, 8, 9, 12 qui ont tant fasciné les pythagorociens et leurs successeurs.

On trouvera, page suivante, l'extrait du *Dictionnaire des Antiquités Grecques et Romaines* de Daremberg et Saglio qui reproduit le dessin de l'hélikon de Ptolémée, d'après l'ouvrage de Georges Pachymère, *Quadrivium*, datant du XIV<sup>e</sup> siècle<sup>53</sup>, avec la traduction du commentaire par Ruelle. L'hélikon aurait également pu avoir été inventé par Quintilien, peu avant Ptolémée, ce que suggère Charles-Emile Ruelle<sup>54</sup>.

---

<sup>52</sup> Au sujet de la *Division du canon*, voir : Patrice Bailhache, Science et musique : quelques grandes étapes en théorie musicale, in *Littérature, médecine et société*, 13, Université de Nantes.

Patrice Bailhache, *Une histoire de l'acoustique musicale*, éd. CNRS, Paris, 2001, chap. I.

<sup>53</sup> Georges Pachymère, *Quadrivium*, éd. A.J.H. Vincent, in Notices et extraits des manuscrits, t XVI, partie 2, p 476 et suiv.

<sup>54</sup> Ch. Em. Ruelle, article 'Hélikon' in *Dictionnaire des Antiquités Grecques et Romaines* de Daremberg et Saglio, t III, partie 1, p 60.

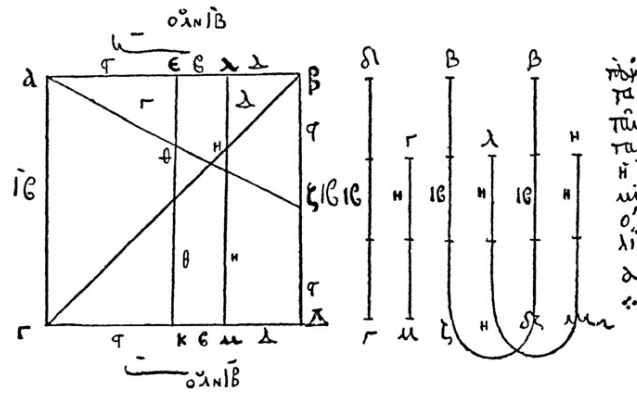


Fig. 3749. — Hélikon.

« On peut encore rapporter le diapason (l'octave) au canon octacorde en s'y prenant d'une autre façon, au moyen de l'instrument appelé *Hélikon*, que les mathématiciens ont construit pour faire connaître les rapports qui résident dans les consonances. Voici comment ils procèdent. On installe un châssis quadrangulaire  $ABGD$ . On partage en deux parties égales les côtés  $AB$ ,  $BD$ , en  $E$  et en  $Z$ . On joint  $AZ$  et  $BHG$ , et l'on mène, parallèlement à  $AG$ , la ligne  $E\Theta K$ , puis, passant par le point  $H$ , la ligne  $LHM$ . Par suite, la ligne  $AG$  est donnée comme double de chacune des lignes  $BZ$ ,  $ZD$ , et par suite aussi, chacune de celles-ci est double de  $E\Theta$ , puisque  $AB$  est double de  $AE$  <sup>6</sup> : de sorte que  $AG$  est quadruple de  $E\Theta$  et sesquiterce de  $\Theta K$ , reste (de  $EK$ ). Or il est démontré que la ligne  $MH$  est double de  $LH$ , puisque  $DB$  est à  $HM$  comme  $DG$  est à  $GM$  <sup>7</sup> et comme  $BA$  est à  $AL$  <sup>8</sup> ; c'est-à-dire encore que  $BZ$  est à  $LH$  comme  $DG$  est à  $GM$  <sup>9</sup>, et par suite  $BZ$  est à  $LH$  comme  $BD$  est à  $HM$  <sup>10</sup> ; et réciproquement  $MH$  est à  $LH$  comme  $BD$  est à  $BZ$  <sup>11</sup>. Donc la ligne  $AG$  est sesquialtère de  $HM$  et triple de  $HL$ . Ainsi donc, si l'on prend quatre cordes d'égale tension, placées dans les mêmes positions que les droites  $AG$ ,  $EK$ ,  $LM$  et  $BD$ , et que l'on y applique une règle (curseur) dans la position de la droite  $ZH\Theta A$ , en faisant correspondre à la ligne  $AG$  le nombre 12, à  $\Theta K$  9, à  $AM$  8,

à chacune des lignes  $BZ$ ,  $ZD$  6 ; puis à  $LH$  4, à  $E\Theta$  3, on obtiendra toutes les consonances et l'intervalle de ton. La consonance de quarte sera établie suivant le rapport sesquitièrs ( $\frac{4}{3}$ ), existant entre les droites  $AG$  et  $\Theta K$ ,  $HM$  et  $ZD$ ,

$LH$  et  $E\Theta$  ; la consonance de quinte suivant le rapport sesquialtère ( $\frac{3}{2}$ ), existant entre  $AG$  et  $HM$ ,  $\Theta K$  et  $ZD$ ,  $BZ$  et  $LH$  ; la consonance d'octave suivant le rapport double ( $\frac{2}{1}$ ), existant entre  $AG$  et  $ZD$ ,  $HM$  et  $LH$ ,  $BZ$  et  $E\Theta$  ; la consonance d'octave et quarte (11<sup>e</sup> suivant le rapport de 8 à 3, existant entre  $HM$  et  $E\Theta$  <sup>1</sup> ; la consonance d'octave et quinte (12<sup>e</sup>) suivant le rapport triple ( $\frac{3}{2}$ ), existant entre  $AG$  et  $LH$ ,  $\Theta K$  et  $E\Theta$  ; la consonance de double octave suivant le rapport quadruple ( $\frac{4}{1}$ ), existant entre  $AG$  et  $E\Theta$  ; enfin le ton, suivant le rapport sesquioctave ( $\frac{9}{8}$ ), existant entre  $\Theta K$  et  $HM$ .

On voit ici que ces mathématiciens d'influence pythagoricienne du début de notre ère n'hésitaient pas à construire des instruments propres à montrer leurs théories, dans un grand souci de pédagogie. Cependant, Ptolémée, dans les Harmoniques, parle de l'hélikon comme d'un instrument en usage à son époque, mais non comme d'une invention de sa part. Il y avait sans doute des hommes de l'art, plus pratiques que nos savants, et qui savaient bien cacher leurs connaissances sous une certaine rusticité. Ceux là n'ont pas laissé d'écrits, et on ne saura jamais vraiment comment Nicomaque avait suspendu ses poids aux cordes soi-disant de longueurs égales..

## Les savants et les musiciens

C'est justement ce point qui pose problème. Les savants écrivent, les 'artistes', non. Par 'artistes', il faut entendre, les musiciens, les luthiers et les différents corps de métier qui participent à l'élaboration des outils utilisés par nos savants.

On a vu comment Pythagore était à la remorque des usages pratiqués par les musiciens de son époque, et comment il a cherché à trouver des lois mathématiques pour réglementer les dimensions de la lyre de Terpandre. Pythagore n'a pas inventé les quarts ni les quintes, ce sont des rapports naturels fondés sur la présence des harmoniques 3 dans les sons des cordes graves, et ce sont également les intervalles consonants les plus simples à produire. On accorde les instruments en tendant plus ou moins les cordes, jusqu'à ce que les battements disparaissent. Comme de nos jours, on accorde les guitares par quarts ou les violons par quintes. Alors pourquoi la dénomination de quart ? Sans doute en raison des quatre cordes, et là, nous n'avons pas d'explication. Ce qui est sûr, en revanche, c'est que les intervalles internes sont mobiles, et laissés à l'appréciation des musiciens. C'est alors que les mathématiciens interviennent, en créant les genres. Pythagore ne connaissait que le genre diatonique, c'est-à-dire une succession (de l'aigu au grave) : un ton - un ton - un 'reste'. Pourquoi cette succession ? Parce que pour accorder une lyre heptacorde, on part du milieu (la mèse), on monte d'une quart (on obtient la nète), on baisse d'une quinte (lichanos), on remonte d'une quart (paranète), on rebaisse d'une quinte (parhypate), et on monte à nouveau d'une quart (paramèse). Les deux intervalles restant, mèse-paramèse et hypate-parhypate sont nommés 'restes', en grec *limma*. Par la suite, Philolaos nommera ce reste *diesis*, nom que reprendra Aristoxène plus tard pour définir le quart de ton. Pendant tous ces siècles de science resplendissante, les mathématiciens ont voulu coller à la mode des musiciens qui ont utilisé à foison ces petits intervalles, dissonants mais tellement sensuels, en leur donnant des valeurs différentes selon les époques. On a, de même, augmenté les tons, pour mettre en valeur ces intervalles et ainsi créé les genres enharmoniques puis chromatiques, composés parfois de ditons encore inédits (tierces majeures ou mineures, qui plaisaient bien aux musiciens parce qu'elles comportent l'harmonique 5), au détriment des petits intervalles (restes) qui devenaient des ornements dans la mélodie. C'est ainsi que des controverses byzantines sur la valeur de ces intervalles, sur la non-divisibilité du demi-ton et autres intervalles ont jalonné ces siècles, supervisées par nos grands philosophes, et sous le regard sans doute amusé des musiciens que seul Aristoxène avait su comprendre. Il est en effet le seul à avoir affirmé que le quart de ton était le plus petit intervalle audible, et qu'un demi-ton se divisait en deux quarts de tons égaux (deux *diesis*), ce qui bien entendu a fait rugir ses détracteurs. Les puristes divisent le ton (9/8) en un *limma* (256/243) et un *apotome* (2187/2048) plus grand que le *limma* d'un *comma* (531441/524288). Les musiciens savent bien à quel point il est difficile de garder l'accord tout au long de l'exécution d'une oeuvre, compte tenu de la température, de la constitution des cordes, de leur élasticité, de l'humidité sur les doigts, du glissement au niveau des fixations. Que dire alors du *comma* (environ 1/9 de ton), qui est semble-t-il le plus petit intervalle perceptible ? Le *comma* trouve sa justification lors de l'accord de plusieurs instruments ensemble, mais il ne joue pas un rôle d'intervalle absolu dans une mélodie, et il faut bien admettre qu'Aristoxène ne manifestait finalement qu'un certain bon sens. Il convient de préciser que les petits intervalles (*diesis*, *limma* et *apotome*) ne s'emploient que pour passer au degré inférieur du tétracorde, et ne sont jamais utilisés isolément ou successivement (« On ne peut chanter successivement plus de deux *diesis* enharmoniques ou quarts de ton, sans s'écarter du chant régulier et mélodique »<sup>55</sup>).

Au début de notre ère, le mouvement de pensée qui s'appuyait sur le retour des idées de Pythagore et de Platon est à l'origine d'une réaffirmation des fondamentaux de la théorie harmonique. On retrouve les vertus du cadre immuable des tétracordes, on fait l'historique des multiples genres (Ptolémée, Aristide Quintilien), et on choisit de façon presque définitive pour l'occident, le genre diatonique platonicien (2 tons 9/8 et un *limma* 256/243). Ptolémée propose une légère modification pour agrandir l'intervalle de *limma* par la différenciation des tons mineurs (10/9) et majeurs (9/8) et la création du demi-ton (16/15). Le système occidental<sup>56</sup> est alors presque complet, il sera confirmé à la fin de la Renaissance par Zarlino qui introduira définitivement les tierces justes majeure (5/4) et mineure (6/5) à la place des ditons. La place est alors nette pour une nouvelle

<sup>55</sup> C.-E. Ruelle, *Etude sur Aristoxène et son école*, in Revue d'Archéologie, t XIV, 1857, p 541.

<sup>56</sup> Dans la tradition arabo-islamique on continue d'utiliser les petits intervalles (*limma* et *apotome*) et on multiplie les intervalles à l'intérieur de la quart (jusqu'à 10 intervalles pour certains théoriciens de la musique du XIème siècle).



controverse, celle des tempéraments, qui s'attellera à la difficulté d'accorder les instruments à notes fixes selon ces intervalles.

Toute cette problématique embrasse donc les siècles qui nous séparent de Pythagore, et constitue ce qu'on peut appeler l'acoustique musicale, matière largement traitée par les musiciens, les facteurs d'instruments, les physiciens, les musicologues et quelques historiens des sciences.

L'acoustique physique s'attache quant à elle à décrire et à comprendre la production des sons, sa propagation et ses caractéristiques et c'est l'histoire de celle là que nous allons à présent aborder.

## **Conclusion**

Lorsque Pythagore établit les règles de mesure de la hauteur des sons, il construit une représentation d'un seul des aspects du phénomène sonore, la hauteur (ou la fréquence pour employer un terme actuel). Cette représentation est, bien entendu, insuffisante pour décrire entièrement le phénomène sonore, puisqu'il n'est pas tenu compte de l'intensité ni du timbre, et encore moins de la variabilité de ces paramètres dans le temps. Dans un premier temps, Pythagore associe des nombres à ces hauteurs, faibles pour les sons graves, élevés pour les sons aigus. Dans les versions postérieures à Boèce, l'expérience des poids tenseurs différents est une pollution dans le raisonnement, elle n'intervient que comme transition entre les deux expériences, et comme elle est fautive, elle est parfaitement inutile au raisonnement. L'analyse de cette parabole ne doit donc retenir que la première expérience, celle des marteaux de Pythagore, dont la loi est présumée juste, et passer directement à celle de la corde tendue de longueur variable, et qui suit la même loi : au grand est associé le grave, au petit est associé l'aigu.

On retiendra également que les pythagoriciens ont établi la notion de degrés dans la mélodie, c'est-à-dire l'idée de notes fixes, discrètes dirions-nous, qui font de la musique ce qu'Aristoxène appelle le 'mouvement discontinu' des sons musicaux, par rapport au 'mouvement continu' de la parole<sup>57</sup>.

Par ailleurs, la représentation spatiale de la hauteur des sons prend forme avec les pythagoriciens, les sons aigus sont représentés par les grands nombres, alors que les lois physiques induisent le contraire. A la même époque on assiste aux débuts de la codification symbolique des sons, et, alors qu'Isidore de Séville avait affirmé que la musique ne pouvait pas s'écrire, il sera bientôt contredit avec l'apparition des neumes, vers le VIII<sup>ème</sup> siècle<sup>58</sup>. Par la suite, la représentation graphique des hauteurs de sons sera une pratique courante dans l'écriture musicale.

En dépit de toutes les imprécisions qui jalonnent la transmission de cette légende des marteaux, le rôle des pythagoriciens dans l'histoire de l'acoustique est d'avoir associé des nombres aux hauteurs de son, et d'avoir proposé une construction de ces nombres pour définir des intervalles consonants.

---

<sup>57</sup> Aristoxène, *Eléments harmoniques*, liv. I, chap. 3, trad. C.-E. Ruelle, P. Haffner, Paris, 1870.

<sup>58</sup> Voir à ce sujet l'étude de Marie-Elisabeth Duchez 'La représentation spatio-verticale du caractère musical grave-aigu et l'élaboration de la notion de hauteur de son dans la conscience musicale occidentale' in *Acta Musicologica*, Vol. 51, Fasc. 1 (Jan.- Jun., 1979), pp. 54-73

## Intermède - Variation sur les marteaux de Pythagore

La légende des marteaux de Pythagore comprend trois parties. La dernière est restée dans l'Histoire comme l'expérience du monocorde. La première concerne les marteaux consonants entendus dans l'échoppe du forgeron. On a vu qu'elle pouvait paraître vraisemblable. La seconde pose problème, parce que Pythagore tend quatre cordes identiques avec des poids dans les rapports de quarte, de quinte et d'octave (6, 8, 9, 12) et obtient, lorsqu'il joue les cordes, les mêmes rapports d'intervalles. On sait que la loi des tensions des cordes vibrantes ne peut pas accepter cette expérience, puisque les rapports de poids devraient être quadratiques (4 pour l'octave, 9/4 pour la quinte et 16/9 pour la quarte).

Sur l'authenticité et la validité de cette expérience, on peut émettre plusieurs hypothèses.

Soit Pythagore n'a pas fait l'expérience, et la légende a été forgée lors du renouveau des idées pythagoriciennes, vers le I<sup>er</sup> siècle.

Soit Pythagore a fait l'expérience, mais il s'est trompé. C'est la position généralement adoptée depuis le XVII<sup>ème</sup> siècle.

Soit Pythagore a fait l'expérience, il ne s'est pas trompé, mais elle a mal été transmise. En explorant cette dernière hypothèse, il est possible d'imaginer une configuration qui convient aux exigences de la physique, et c'est l'objet de cette recherche. Il s'agit d'une spéculation qui ne s'appuie sur aucun texte, mais sur une interprétation des textes disponibles, et qui malgré tout est cohérente.

Il est légitime de se poser la question de l'authenticité et de la validité de l'expérience. Partons de l'hypothèse qu'elle a eu lieu. Dans ce cas, un des paramètres a mal été transmis au premier auteur connu, Nicomaque de Gêse, au II<sup>ème</sup> siècle. Rappelons qu'aucun auteur antérieur ne fait état de cette expérience. Mais est-ce un argument, l'absence de texte, pour en conclure quoi que ce soit, compte tenu du faible nombre de textes qui nous sont parvenus. N'oublions pas que les idées pythagoriciennes ont été longtemps et vigoureusement combattues. La légende est donc peut-être l'œuvre de Nicomaque, ou alors il a assisté à cette démonstration effectuée par un homme de l'art qui n'a pas laissé d'écrits retrouvés à ce jour. On peut conjecturer que c'est soit Nicomaque qui a mal compris les éléments de l'expérience, soit les copistes, entre Nicomaque et Jamblique (qui vient après) qui ont mal transmis.

Reprenons l'expérience telle qu'elle est décrite au livre VI de l'*Introduction harmonique* de Nicomaque de Gêse.

Il suspendit à ce clou quatre cordes semblables par la substance, le nombre des fils, la grosseur, la torsion, et fit supporter à chacune d'elles un poids qu'il fixa à son extrémité inférieure. De plus, il rendit les longueurs des cordes de tout point égales, [...] <sup>59</sup>.

Prenons l'hypothèse que les cordes sont égales, et tentons de nous représenter les gestes de l'expérimentateur. Il fait sonner les cordes par paires, elles ne produisent pas de consonances. Par exemple, l'accord entre les deux cordes égales correspondant aux poids 6 et 12 ne sonnent pas l'octave. Pire, le rapport de fréquence est de 1,414, ce qui donne un intervalle de triton (do-fa#), extrêmement désagréable à l'oreille. Nous pouvons déterminer les rapports de fréquence pour chaque paire, grâce à la formule de Taylor, qui établit la fréquence d'une corde vibrante en fonction de la tension et de la longueur, sans tenir compte de la masse :

$$F = k(\sqrt{T}) / L$$

F est la fréquence, T la tension, L la longueur et k une constante liée à la masse par unité de volume de la corde, supposée constante ici. Par ailleurs, Les longueurs L sont donc ici supposées égales. Entre les cordes de poids 6, 8, 9 et 12, qui déterminent les tensions T, nous aurons les rapports de fréquence:

$$8 \text{ et } 6, F/F' = 2 / \sqrt{3}$$

$$9 \text{ et } 6, F/F' = 3 / \sqrt{6}$$

<sup>59</sup> Nicomaque de Gêse, *Manuel d'harmonique et autres textes relatifs à la musique*, Trad. C.-E. Ruelle, in 'Collection des auteurs grecs relatifs à la musique', Baur, Paris, 1881.

12 et 6,  $F/F' = \sqrt{2}$

12 et 8,  $F/F' = \sqrt{6} / 2$

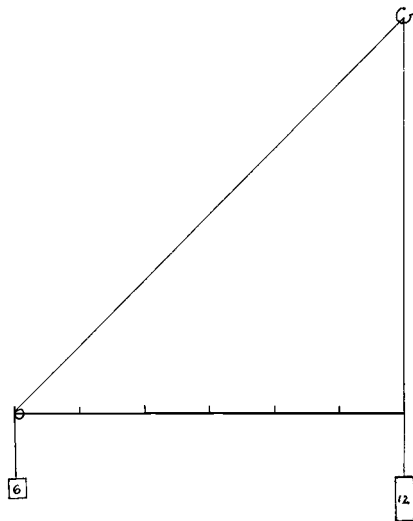
12 et 9,  $F/F' = 2\sqrt{3} / 3$

9 et 8,  $F/F' = 3 / 2\sqrt{2}$

Aucun de ces rapports n'est consonant, ils sont incommensurables. C'est contrariant pour Pythagore. Il veut d'abord établir un rapport d'octave entre les cordes de poids 6 et 12, c'est le rapport le plus simple, car il est facile de confectionner deux poids de rapport 2. Comment est-il possible qu'il ne se soit pas aperçu de l'erreur ? Cela paraît difficilement concevable. Alors, il fait ce que n'importe qui ferait : comme la corde de poids 6 est trop aiguë, il la rend plus grave en l'allongeant. Mais comment sont disposées les cordes ? Nicomaque nous dit : *Il fixa un clou unique dans l'angle formé par deux murailles*. Si elles sont verticales, cela semblerait assez peu pratique, d'autant qu'elles sont, d'après le texte, de longueurs égales. On imagine les cordes qui s'enchevêtrent, les poids qui se bousculent... Pourquoi donc ce clou dans l'angle ? Ne doit-on pas y voir une disposition dans laquelle les cordes seraient horizontales ? Mais alors, elles devraient former un angle avec le mur, et Nicomaque semble délaisser ce point pourtant essentiel.

Supposons que la corde de poids 12 soit le long du mur, tendue à la verticale. Pythagore constate l'absence de consonance à l'octave, il allonge une des deux cordes, ce que ferait n'importe quel expérimentateur, pour atteindre la note désirée. Il construit une structure rigide constituée d'une barre horizontale, donc perpendiculaire au mur. Lorsqu'à l'oreille il atteint l'octave inférieure, il la fixe avec un arrêt (une poulie fixée à la structure) qui laisse pendre le poids, et procède aux mesures.

Surprise pour Pythagore, la distance de ce point au mur est égale à la longueur de la corde de poids 12 (celle qui est le long du mur). Donnons à la longueur de corde la valeur 6. Si on appelle  $F_{12}$  la fréquence de la corde dont le poids est 12, et  $F_6$  celle de la corde de poids 6, alors en effet, on a alors pour les fréquences :  $F_{12} = \sqrt{12} / 6$  pour le poids de 12 et la longueur de corde correspondant, et  $F_6 = \sqrt{6} / 6\sqrt{2} = \sqrt{12} / 12$  pour le poids de 6 et la longueur de corde diagonale (en effet la diagonale d'un carré 6 est  $6\sqrt{2}$ ). Nous avons donc bien  $F_{12} = 2 F_6$ , et le rapport double des fréquences détermine l'octave.



Soyons clair, il ne s'agit pas d'une affabulation, tout au plus d'une hypothèse possible. Si on accepte l'idée que Pythagore a expérimentée, il a forcément fait cela. Pythagore ne se serait pas contenté d'une erreur aussi manifeste, il aurait cherché la solution, par la pratique. Les poids sont en rapport double, il faut donc produire l'octave en compensant l'erreur par l'allongement de la corde. Il est clair que sa surprise a dû être grande en constatant l'égalité de la distance au mur et de la longueur de corde de poids 12. On sait que Pythagore a bien expérimenté sur les rapports consonants à partir de différentes techniques, comme l'atteste Théon de Smyrne, dans un texte un peu antérieur à celui de Nicomaque, et qui se fonde sur les *Harmoniques*, traité perdu, écrit par Archytas<sup>60</sup> :

<sup>60</sup> Theon de Smyrne, *Exposition des connaissances mathématiques utiles pour la lecture de Platon*, traduction du grec au français J. Dupuis, Paris, Hachette, 1892, p 93.

[..] C'est Pythagore, disons-nous, qui paraît avoir découvert ces rapports, par la longueur et la grosseur des cordes, ainsi que par la tension à laquelle il les soumettait en tournant les chevilles, ou par une méthode plus connue, en y suspendant des poids [..]. Quelle que soit la méthode choisie parmi celles que nous venons de citer, on aura la consonance suivant le rapport indiqué, toutes choses égales par ailleurs.

Théon de Smyrne évoque également les vases remplis de plus ou moins d'eau ainsi que les flûtes. Le texte indique bien que Pythagore joue à la fois sur la longueur, la grosseur et la tension des cordes. Nous sommes loin de la légende de Nicomaque et de ses marteaux de forgeron, on fait maintenant ici appel à la grosseur des cordes qui intervient également dans le calcul de la fréquence. Et plus loin, en conclusion<sup>61</sup> :

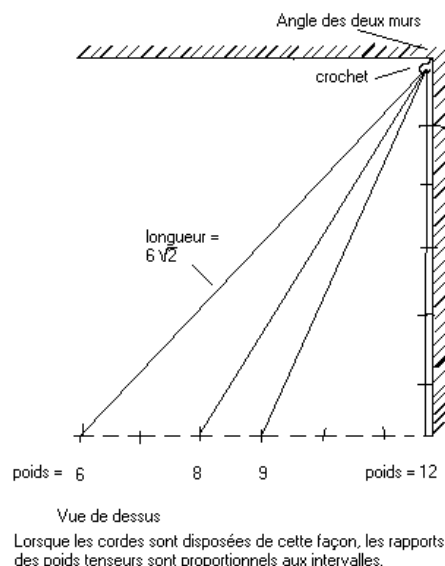
Ceux qui ont mesuré les consonances avec des poids, ont suspendu à deux cordes des poids dans les rapports que nous avons dits et qu'on avait obtenus par la longueur des cordes, en déterminant les consonances de ces cordes.

Reconstituons la démarche de Pythagore. Il cherche à établir un rapport de proportionnalité entre la tension, la fréquence et la longueur de corde, ou une fonction simple de cette longueur. Reprenons la formule de Taylor qui détermine la fréquence :  $F = k(\sqrt{T}) / L$ . Si nous voulons, avec Pythagore, établir cette proportionnalité, nous aurons alors :

$pF = k(\sqrt{p}) / f(p)$ ,  $p$  étant le poids tenseur, et  $f(p)$  une fonction à trouver qui détermine la longueur de corde en fonction du poids tenseur. La recherche de Pythagore, en langage moderne, consiste à trouver cette fonction. Parmi les fonctions possibles, il en est une que nous allons développer qui aurait pu être découverte empiriquement par Pythagore, considérant sa connaissance des triangles rectangles auxquels cette hypothèse fait appel. Cette fonction remplit presque parfaitement les conditions requises de proportionnalité simple entre fréquence et tension, donc entre intervalles et poids tenseurs, moyennant une relation faisant intervenir la distance au mur qui détermine la longueur de corde.

Alors partons de l'idée que Pythagore a expérimentée, et qu'il a tendu une corde de poids moitié selon la diagonale d'un carré, corrigeant ainsi l'insuffisance du rapport de poids. Pythagore est, on le sait, un fin connaisseur de la géométrie des triangles rectangles. Il a produit le rapport d'octave grâce à la diagonale du carré, il cherche donc à produire les rapports de quarte et de quinte suivant le même procédé, c'est-à-dire en allongeant les deux cordes selon les accords désirés, formant ainsi deux triangles rectangles de côté horizontal plus petits.

Pythagore mesure alors les distances au mur entre les différents points qui produisent les intervalles intermédiaires (8 et 9), et constate qu'elles sont égales respectivement à  $12 - p$ ,  $p$  étant le poids fixé à la corde, et l'unité de longueur étant le sixième de la longueur produisant l'octave, et également le sixième de la longueur de la corde la plus courte, celle de poids 12.



Le 'tétracorde triangulaire rectangle' fonctionne, il y a bien proportionnalité entre les rapports de poids et les intervalles. Et c'est ici que le mathématicien conventionnel ne comprend plus, parce qu'il n'y a aucune raison mathématique simple pour que cela fonctionne. On a en effet une relation avec  $p$  comme coefficient d'un

<sup>61</sup> Theon de Smyrne, *idem*, p 99.

membre de l'égalité,  $\sqrt{p}$  au numérateur de l'autre membre, et une fonction en  $p^2$  au dénominateur. Nous avons ici une conjonction particulière de ces quatre nombres qui permet de respecter cette harmonie, et nous allons l'étudier attentivement.

Cette série, 6, 8, 9, 12 a fasciné les Pythagoriciens, notamment Aristée de Crotone, Philolaus, Archytas de Tarente, puis plus tard Theon de Smyrne, Nicomaque de Gêrasede et Jamblique. Dans son Histoire de la science Hellène, Paul Tannery parle de cette série<sup>62</sup> :

Du pythagoricien Aristée de Crotone, successeur immédiat de Pythagore, suivant la tradition, Iamblique (p 168) rapporte qu'il avait parlé de la proportion  $6 : 8 :: 9 : 12$ , enseignée à Pythagore par les Babyloniens, et les *Théologumène* (VI) disent qu'il avait montré que, dans la décade, il n'est pas possible de trouver un autre nombre que 6 susceptible de tous les rapports de l'harmonie psychique, c'est-à-dire, sans doute, pouvant servir de point de départ à une telle proportion.

Cette citation ne pourrait avoir de valeur que si elle s'appuyait sur un témoignage traditionnel de Philolaus, auquel la connaissance de cette proportion et la désignation de l'âme comme harmonie sont au reste attribuées. Une attribution de ce genre ne peut être contestée, puisqu'elle se réfère à un ouvrage célèbre dans l'antiquité et qui existait certainement encore au temps de Iamblique. On a de cet ouvrage de nombreux fragments dont l'authenticité est généralement reconnue et dont plusieurs ont un caractère mystique très accusé.

Pour quelle raison cette suite de nombres prend-elle ce caractère mystique et unique, on ne le sait que par l'application qui en est faite à la musique, comme l'atteste Jamblique. Il est probable cependant que, venant des Babyloniens, elle ait été utilisée pour établir une grille de partage, à l'usage du commerce ou des successions. L'hypothèse proposée, par la construction de triangles rectangles respectant ces proportions et auxquelles on applique des poids est une suggestion. Néanmoins elle fonctionne et donne une explication à la fascination exercée par cette suite de nombres sur les théoriciens de la musique pythagoricienne.

Pour calculer les longueurs de cordes, on applique :

$L = \sqrt{[6^2 + (12 - p)^2]}$ , le carré mesure 6, et on reporte les nombres de Pythagore nommés p, soit 6, 8, 9, 12.

La fréquence F est déterminée comme suit :  $F = k(\sqrt{T}) / L$

Poids (tension T)	Racine des poids ( $\sqrt{T}$ )	Longueur de la corde	Coefficient de proportionnalité de la fréquence ( $\sqrt{T}) / L$
6	2,449	8,485	0,288
8	2,828	7,2115	0,392
9	3	6,708	0,447
12	3,464	6	0,577

Le rapport des coefficients de proportionnalité des fréquences nous donne le rapport d'intervalles :

Intervalle et rapport théorique	Rapport des poids	Rapports des coefficients de fréquence	Erreur
2 : octave	12 / 6	2	0
4 / 3 = 1,33 : quarte	8 / 6	1,36	0,98
4 / 3 = 1,33 : quarte	12 / 9	1,29	1,03

<sup>62</sup> Paul Tannery, *Pour une histoire de la science hellène*, Paris, Gauthier Villars, 1930, p 391. Tannery fait référence à un ensemble de textes réunis sous le nom de *Fragments philoaiques sur la musique*, cités dans les Mémoires Scientifiques III, p. 220-243.

$3/2 = 1,5$ : quinte	$12/8$	1,47	1,02
$3/2 = 1,5$ : quinte	$9/6$	1,55	0,97
$9/8 = 1,125$ : ton	$9/8$	1,14	0,99

L'erreur est calculée comme le rapport des valeurs théoriques aux coefficients de fréquence. Si cette erreur atteint 1,06, elle est d'un demi-ton. On voit que les erreurs sont toutes inférieures au quart de ton, limite de perception tonale selon Aristoxène, on les considère donc insignifiantes, compte tenu de la précision des mesures de longueurs, de poids et de hauteur de son à cette époque.

La conjonction de la série de nombres ayant entre eux les rapports harmoniques, avec celle des poids tenseurs, puis des longueurs des hypoténuses est tout à fait fortuite. Il n'y a aucune loi apparente qui les lie et qui permettrait de généraliser. En effet, nous avons la formule de Taylor qui détermine la fréquence  $F$  d'une corde vibrante,

$F = k(\sqrt{T}) / L$ , avec  $k$  supposée constante, liée à la masse de la corde.

La longueur de corde  $L$  est déterminée par le calcul de l'hypoténuse,

soit  $L = \sqrt{6^2 + (12 - p)^2}$ , avec  $p$  entier compris entre 6 et 12.

Si on donne à  $T$  les valeurs différentes de  $p$ , et qu'on veut que la fréquence suive la même proportionnalité de facteur  $p$ , on doit avoir, suivant la formule de Taylor

$F = k(\sqrt{T}) / L$  :

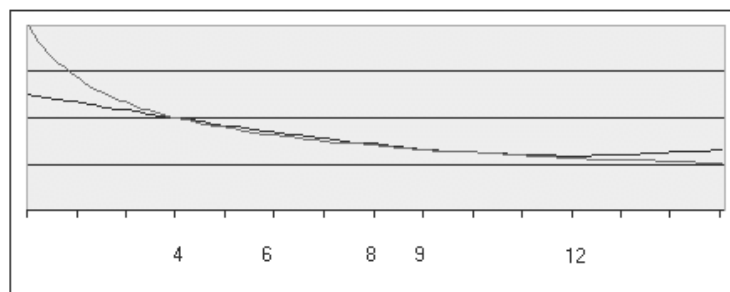
$pF = k(\sqrt{p}) / L$ , et donc  $L = k'(\sqrt{p/p})$ , avec  $k' = k/F$

mais on a aussi  $L = \sqrt{6^2 + (12 - p)^2}$

Sur le graphe ci-dessous, on représente :

en rose la courbe de  $L = \sqrt{6^2 + (12 - p)^2}$

en bleu la courbe de  $L = k'(\sqrt{p/p})$ , avec  $k' = 20$



On voit que les deux courbes coïncident presque parfaitement entre les valeurs 4 et 12, et donc bien sûr pour les valeurs qui nous intéressent, 6, 8, 9, 12. Ce qui signifie que pour ces valeurs, la longueur de corde est égale, à un facteur près ( $k'=20$ ), d'une part à celle qui est calculée selon l'hypoténuse, en fonction de la distance au mur, et d'autre part à celle qui est fonction de la tension. Ce qui veut dire que pour ces valeurs, on respecte les proportions entre fréquence, tension et distance.

On peut formaliser cette égalité par une équation en faisant le rapport des deux expressions :

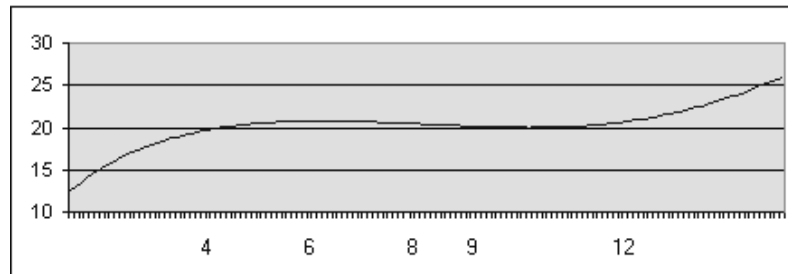
$pF = k(\sqrt{p}) / \sqrt{6^2 + (12 - p)^2}$ , d'où  $p[\sqrt{6^2 + (12 - p)^2}] / \sqrt{p} = \text{constante}$ .

On a donc l'équation  $[\sqrt{p[6^2 + (12 - p)^2]}] - k' = 0$ , avec  $k' = k/F$ .

C'est une équation du troisième degré qui présente, à un endroit de sa courbe, une portion presque constante, et c'est là que les nombres de Pythagore prennent place. En effet, si on fait le rapport des deux membres de l'égalité de façon séparée, on obtient approximativement une constante entre 6 et 12 :

Poids = p	$\sqrt{p}$	$\sqrt{[6^2 + (12 - p)^2]}$	$\sqrt{p[6^2 + (12 - p)^2]}$
6	2,449	8,48528137	20,7846097
8	2,828	7,21110255	20,3960781
9	3	6,70820393	20,1246118
12	3,464	6	20,7846097

Voici le graphe de la courbe, pour une valeur de p entre 1 et 15 :



La portion de courbe entre 6 et 12 est quasiment constante, ce qui permet de vérifier la relation d'égalité à un facteur près, et donc d'attribuer aux fréquences les rapports harmoniques identiques à ceux des poids et des distances qui déterminent les longueurs de cordes. La valeur 20 du rapport n'a aucune influence sur le résultat, on est dans le domaine des rapports, et ce qui compte c'est que celui-ci soit constant pour toutes les valeurs de p considérées.

Il est donc tout à fait plausible que l'expérimentateur ait procédé de cette façon, selon une démarche empirique, bien entendu. Néanmoins on objectera que c'est une hypothèse qui n'est corroborée par aucun texte. Mais justement les différentes versions sont très peu claires dans la description du protocole utilisé. Cette confusion permet l'élaboration d'hypothèses, et celle-ci fonctionne. Par ailleurs, il est vrai que les pythagoriciens de la première heure sont fascinés par l'exactitude et la perfection des opérations sur les nombres (voir la *tétractys*). Néanmoins, plus tard, Aristoxène de Tarente, successeur d'Archytas lui-même pythagoricien fidèle, se rebelle contre le dogme du nombre et introduit l'empirisme dans la musique, avec sa nécessaire imprécision. Il est probable que cette expérience ait été effectuée, à la suite de celle d'Hippase et de ses disques de bronze, par Archytas, et transmise par Aristoxène<sup>63</sup>, tous deux de Tarente, ainsi que le rapporte Théon de Smyrne.

Les pythagoriciens ont effectué des expériences, c'est attesté par de nombreux textes, certes de sources secondaires, comme celui de Théon de Smyrne, mais qu'il n'y a aucune raison de suspecter. Par contre, il est vrai que, au cours des siècles suivants, c'est un savoir dogmatique qui se transmet, et en effet, chez Nicomaque comme chez Boèce, et comme pour la plupart des relais de transmission jusqu'à la Renaissance, on est bien en présence d'un recopiage, sans vérification, d'une confiance abusive dans la vérité du dogme.

En 1892, Théodore Reinach écrit un article dans la Revue des Etudes Grecques sur les '*Problèmes musicaux*' d'Aristote (probablement écrits par son disciple Théophraste). A la fin de son article, il sollicite Paul Tannery et son érudition pour élucider ce point de la légende de Pythagore. Voici ce que conclut l'éminent historien<sup>64</sup> :

[...] En résumé, il ne me paraît pas douteux que la relation des poids tenseurs n'ait été étudiée par les anciens, et si la proportionnalité à la racine carrée n'est nullement énoncée dans les documents qui nous restent, il me semble incontestable qu'elle a dû être reconnue; car la question était simplement de reconnaître si l'accord d'octave s'obtenait avec les poids 1 et 2, ou 1 et 4, et l'accord de quinte avec les poids 1 et 3/2, ou 1 et 9/4.

Ces expériences ont dû en fait être poursuivies par l'école pythagoricienne avant Aristote (en dehors de Lasos, on cite Hippasos, mais on doit surtout penser aux écrits d'Archytas et d'Eudoxe). Après Aristote, les recherches expérimentales furent abandonnées et on se contenta de notions vagues et inexactes en admettant en principe l'existence de relations numériques simples.

<sup>63</sup> Aristoxène fait allusion à l'Art de Glaucos et aux disques d'Hippase dans un traité perdu, *De la musique* (Diels, *les présocratiques*, trad franc, p 79).

<sup>64</sup> Paul Tannery, in Th. Reinach 'Notes sur les problèmes musicaux', *Revue des études grecques*, 1892, 17-2, p 52, post scriptum de P. Tannery.

Nous ne pouvons que nous ranger à cette analyse : les pythagoriciens ont expérimenté, ils ont forcément observé la proportionnalité des carrés des poids tenseurs avec les rapports d'intervalles. Si ces expériences ont donné lieu à des écrits, ils ont forcément relaté cette proportionnalité quadratique. Mais la notion de carré étant encore peu familière et surtout délicate à formaliser, les successeurs (ceux de Philolaus et d'Archytas, peut-être...) ont simplifié maladroitement la relation en énonçant la simple proportionnalité. Cet exemple est édifiant : Lorsque Porphyre (III<sup>ème</sup> siècle) dans sa *Vie de Pythagore*, relate l'histoire du fameux théorème, il parle de *l'égalité de la somme des côtés du triangle avec l'hypoténuse*<sup>65</sup>, sans même mentionner le terme de 'carré'. Enfin, corroborant cette hypothèse des longueurs de cordes inégales, Thomas-Henri Martin, dans ses *Etudes sur le Timée de Platon*, se range à cet avis, suivant ainsi la suggestion de Gaudence dans son récit de l'expérience des poids de Pythagore<sup>66</sup> :

Il est donc probable que Pythagore, comme Gaudentius le rapporte, s'avisait de tendre les cordes de même grosseur et de même nature, mais de longueurs différentes [...]

Résumons les éléments qui tendent à défendre cette installation audacieuse en regard du texte de Nicomaque :

- Selon Nicomaque, les cordes sont maintenues au même clou. Quel serait l'intérêt, si elles sont d'égale longueur? Cette disposition présente une gêne inutile à la démonstration. Par contre cette disposition permet de tendre les cordes de façon oblique, en créant autant de triangles rectangles avec un des murs.

- Nicomaque nous dit comment les cordes portant les poids sont tendues : *Il fixa un clou unique dans l'angle formé par deux murailles*. Pourquoi donc ce clou dans l'angle, si ce n'est pour former des triangles?

- Or on sait l'importance chez Pythagore de la géométrie du triangle rectangle qu'il maîtrise parfaitement.

- Nicomaque parle bien de cordes plus longues et plus courtes, alors qu'il dissocie bien dans le texte les cordes tendues par les différents poids.

- Par ailleurs les différentes versions qui nous sont parvenues sont soit évasives, soit muettes sur l'explication de cette proportion supposée entre les poids tenseurs et les hauteurs de notes. Il y a quelque part une erreur qui a été mal transmise et recopiée, car il est très probable que l'expérience ait été correctement réalisée, sans doute pas par Pythagore lui-même, mais au moins par Archytas.

- Enfin il n'y a aucune raison de faire l'exposé d'une manipulation dont les résultats sont faux de façon évidente et spectaculaire, au moins concernant les premiers expérimentateurs qui sont à l'origine de l'histoire, Pythagore lui-même, Philolaus, Archytas ou d'autres...

La question se pose de la nécessité de faire une telle expérience qui présentait tant de difficultés de manipulation. A la fin de la période pythagoricienne, une controverse existe entre ceux qui associent les grands nombres à l'acuité des sons, et ceux qui proposent l'inverse, selon les lois physiques qui associent les grandes dimensions aux sons graves. On le sait, les deux méthodes seront utilisées conjointement avec le monocorde, au prix de l'inversion des rapports, gymnastique constante des théoriciens de l'harmonie. La première formule s'inspire de l'analogie supposée entre la hauteur des sons et leur 'vitesse'. Le monocorde, comme les flûtes, ne permet pas cette première représentation. Alors que la méthode des poids tenseurs permet de rendre compatible l'échelle mathématique avec les contraintes de la physique. De plus, l'utilisation de poids induit une autre analogie, celle du poids et de la vitesse, qui est compatible avec la physique de l'époque.

Peu importe de savoir si c'est Pythagore lui-même, ou ses successeurs qui ont réalisé cette expérience. Cette histoire a forcément un fondement pratique et expérimental. En effet, il est inconcevable que cet ensemble de conjonctions, tout à fait fortuites, ait pu germer uniquement de façon mentale. Par la suite, les différentes transcriptions, et notamment celle de Boèce, très insuffisante, n'ont pas permis de transmettre la complexité de la manipulation qui apparaît donc comme fortement dégradée dans la littérature future. Le texte de Nicomaque, ou peut-être celui de Gaudence, est apparemment fondateur, vers le I<sup>er</sup> siècle, de la légende des marteaux de Pythagore puisque Theon de Smyrne, son inspirateur, n'en parle pas. Théon lui-même s'inspire d'Adraste dont nous n'avons aucun texte. Est-ce Théon qui a occulté le texte? Est-ce un de ses prédécesseurs? On peut admettre

<sup>65</sup> Porphyre, *Vie de Pythagore*, trad. E. Des Places, Ed. Les belles lettres, Paris, 1982, p 53. Le traducteur relève l'omission.

<sup>66</sup> Thomas-Henri Martin, *Etudes sur le Timée de Platon*, Paris, 1844, p 391.



qu'Euclide ou Ptolémée refusent de raconter une anecdote qui ternirait le sérieux de leur propos. Mais Platon ne rechigne pas à orner ses écrits de telles métaphores, et lorsqu'il traite des rapports et des intervalles musicaux, dans le *Timée*, il n'en dit mot. En revanche la période des premiers siècles de notre ère est nettement favorable à une présentation romanesque de la science, et c'est sans doute à cette époque que fut élaborée cette légende. Quoi qu'il en soit, le texte de Nicomaque est imprécis, mais porte en lui la solution proposée ici.

La principale objection à l'hypothèse proposée, c'est ce texte de Nicomaque, dont la traduction de Ruelle nous dit que *les cordes étaient de tout point rendues égales*. Mais dans une phrase distincte de la précédente on nous donne les autres qualités de ces cordes (*semblables par la substance, le nombre des fils, la grosseur, la torsion*). Plus loin Nicomaque nous parle de *la plus grande corde*, puis de *la plus petite*. Charles Emile Ruelle a la réputation d'un excellent helléniste, et sa traduction est fiable. Pourtant lui-même est contraint d'ajouter une note pour suggérer une ellipse à propos de cette *plus grande corde*. Alors en effet Nicomaque ne parle pas de la disposition triangulaire des cordes. Theon de Smyrne non plus, et nous ne disposons pas des écrits d'Archytas et de Philolaus. Et pourtant on a cette précision concernant le clou dans l'angle de deux murs.

Est-il légitime de suspecter une mauvaise transmission du texte ? Deux périodes sont en cause pour lesquelles nous n'avons pas de trace : la première, entre les pythagoriciens de la première heure et Nicomaque, la seconde entre Nicomaque et le XVI<sup>ème</sup> siècle, époque de copie du manuscrit du *Manuel d'harmonique* utilisé par Meursius en 1617. La plus ancienne copie recensée est un manuscrit du XIV<sup>ème</sup> siècle<sup>67</sup>. Pendant tout le Moyen Âge et la Renaissance, seul le texte de Boèce semble avoir une quelconque influence, et on a vu la légèreté avec laquelle il rapporte l'expérience.

La suggestion proposée ici de la disposition triangulaire est peut-être inexacte, mais la coïncidence de la courbe de l'équation qui présente une portion constante entre 6 et 12 est suffisamment troublante pour échafauder cette hypothèse. Il est donc possible de rendre les intervalles proportionnels aux rapports des poids tenseurs en jouant sur une construction à base de triangles rectangles, qui détermine les longueurs de cordes en fonction des nombres mis en jeu, soit la suite 6, 8, 9, 12.

Il semble donc qu'on puisse bien affirmer que Pythagore, ou son successeur, ne s'est trompé dans aucune des trois expériences. Dans la première expérience, celle des poids sonores, s'ils se présentent sous la forme de parallélépipèdes de métal, ils se comportent comme des lames de vibraphone et donc produisent des sons dont les hauteurs sont proportionnelles aux longueurs. Dans la seconde expérience, nous venons de le voir, grâce à un dispositif particulier des cordes tendues qui forment les hypoténuses de différents triangles rectangles. Et bien entendu dans la troisième, celle du monocorde, dans laquelle les rapports de longueur d'une seule corde sont bien équivalents aux rapports inverses qui déterminent les intervalles consonants.

---

<sup>67</sup> BNF, Fonds grec, Ms 2450.

### 3 - Le son est choc

#### Le bruit

#### Archytas

Archytas de Tarente est né probablement une douzaine d'années avant Platon, vers la fin du Vème siècle. Il fait partie de la mouvance pythagoricienne, mais son approche est nettement plus physique, il construit et expérimente, et constate forcément les limites de la perfection mathématique enseignée par le maître. On lui doit notamment la construction d'un dispositif destiné à calculer la duplication du cube, ainsi que des automates. On le considère de nos jours comme le premier acousticien, du moins celui dont on peut lire quelques écrits fiables. Il s'agit principalement d'extraits transmis plus ou moins fidèlement par Porphyre au IIIème siècle de notre ère, dans ses Commentaires sur l'harmonique de Ptolémée<sup>68</sup>.

Voici l'extrait essentiel de la théorie de la production des sons chez Archytas :

[...] Ils [les mathématiciens] ont ainsi découvert les premiers qu'il ne peut se produire de son que si des corps se heurtent entre eux. Selon eux, le heurt se produit au moment de la rencontre et de la collision de corps en mouvement. Il y a son, tantôt quand des corps, animés de mouvements contraires, se freinent mutuellement en se heurtant, et tantôt quand des corps, emportés dans une même direction, mais à des vitesses inégales, sont heurtés par ceux qui les suivent en voulant les dépasser. Or beaucoup de ces bruits sont tels que notre nature ne nous permet pas de les percevoir, soit en raison de la faiblesse du choc, soit parce qu'une grande distance nous en sépare, soit encore en raison de l'excès d'amplitude de ces bruits (car les bruits de forte amplitude ne pénètrent pas en notre ouïe, de la même façon que rien ne pénètre à l'intérieur d'un vase à l'embouchure étroite, quand on veut y verser une [trop] grande quantité [de liquide]).

Archytas parle des 'mathématiciens' dont il cite l'explication de la production des sons. Il s'agit sans doute de Pythagore et de ses disciples, mais nous n'en avons pas trace. Bien entendu cette définition est insuffisante, puisque nombre de bruits sont produits sans qu'il y ait un choc manifeste qui en soit la source, et réciproquement. C'est pourquoi Archytas propose que certains chocs soient silencieux, soit parce qu'ils sont trop faibles, soit au contraire trop intenses. C'est ici la première approche du son, et le paramètre immédiatement perceptible, avant la hauteur, c'est son intensité. Et Archytas énonce la première loi de propagation, l'accroissement de la distance entre l'auditeur et le lieu de production du son diminue son intensité. Pas de mesure ici, pourtant il aurait été facile d'en pratiquer, en évaluant, de façon relative par l'audition, l'intensité de sons produits par un ou plusieurs chocs simultanés, et en mesurant la distance de perception. On ne voit pas bien quels sont ces bruits trop intenses pour être perçus, si ce n'est l'allusion, qui réapparaîtra plus tard, aux sons des astres en mouvement.

Pour Archytas le choc est consécutif à la collision de deux corps en mouvement, mais il ne développe pas l'idée de la nécessité du mouvement pour produire un son. En particulier Archytas ne dit rien de la voix ou des instruments à vent, dans lesquels les chocs ne sont pas évidents, quand bien même certains de ses successeurs y verront des ébranlements de l'air consécutifs à un choc. Par ailleurs, Archytas use du terme *ψόφος*, qui signifie bruit ou son d'une façon très générale, alors que dans les textes concernant l'acoustique qui vont suivre, on trouve le mot *φθόγγος*, qui est un son inarticulé, différent de la voix (*φωνή*), mais qui suppose une certaine musicalité, au sens d'une constance de la note.

#### Aristote, le chapitre 8 du livre II du Traité de l'Âme

Platon, qui s'est fortement inspiré d'Archytas pour ses théories concernant la musique, ne dit rien de la production des sons<sup>69</sup>. Aristote est plus précis et développe la première théorie physique de l'acoustique, dans un court passage du *De anima* ou *Traité de l'âme*<sup>70</sup> :

Maintenant, pour commencer, établissons des distinctions au sujet du son et de l'ouïe. Le son se dit en un double sens: il y a le son en acte et le son en puissance. Pour certaines choses, en

<sup>68</sup> Ces extraits ont été traduits par Diels, à partir du *Commentaire sur les Harmoniques de Ptolémée*, écrit par Porphyre au IIIème siècle.

Hermann Diels, *Die Fragmente der Vorsokratiker*, trad. française par J.P. Dumont, *Les présocratiques*, Gallimard, Paris, 1988, p 533-535.

Une étude approfondie sur Archytas est parue récemment : Carl A. Huffman: *Archytas of Tarentum. Pythagorean, Philosopher and Mathematician King*, Cambridge University Press 2005. Huffman exprime quelques doutes sur l'exactitude du texte transmis par Porphyre, mais le passage cité ici semble correct.

<sup>69</sup> Dans le *Timée* il existe deux passages où Platon traite du mouvement des sons, il seront traités plus loin.

<sup>70</sup> Aristote, *Traité de l'âme*, *De anima*, livre II, chap. 8.

effet, nous disons qu'elles n'ont pas de son par exemple l'éponge, la laine; pour d'autres, qu'elles possèdent le son: c'est le cas de l'airain et, en général, de tous les corps durs et lisses, parce qu'ils ont la puissance d'émettre des sons, c'est-à-dire de rendre, dans le milieu qui est intermédiaire entre l'objet sonore et l'organe de l'ouïe, un son en acte.

La production du son en acte est toujours celle de quelque chose, par rapport à quelque chose, et dans quelque chose, car c'est un choc qui est la cause productrice du son. C'est pourquoi aussi, il est impossible que d'un unique objet provienne un son, car la distinction entre le corps frappant et le corps frappé a pour conséquence que ce qui résonne ne résonne que lorsqu'il est en rapport avec quelque chose. De plus, le choc n'a pas lieu sans un mouvement de translation.

Mais, comme nous l'avons dit ce n'est pas le choc de deux corps pris au hasard qui constitue le son. La laine, en effet, ne rend aucun son si on la frappe, au contraire de ce qui se passe pour l'airain et pour tous les corps lisses et creux: l'airain, c'est parce qu'il est lisse, tandis que les corps creux produisent, par répercussion, une série de chocs à la suite du premier, l'air qui a été mis en mouvement étant dans l'impossibilité de s'échapper.

De plus le son est entendu dans l'air et aussi dans l'eau, quoique moins distinctement. Toutefois la condition déterminante du son n'est ni l'air, ni l'eau: ce qu'il faut, c'est que se produise un choc de solides l'un contre l'autre et contre l'air. Cette dernière condition est remplie, quand l'air, une fois frappé résiste et ne se disperse pas. De là vient qu'il doit être frappé rapidement et fortement pour résonner. Le mouvement du corps frappant, en effet, doit prévenir la dispersion de l'air, comme si l'on frappait un tas ou une rangée de grains de sable se mouvant avec rapidité.

Ce passage dans lequel Aristote explique la genèse des sons est d'une grande importance dans l'histoire de l'acoustique physique. Il sera repris, commenté, complété, agrémenté ou édulcoré, mais rarement contredit jusqu'au XVII<sup>e</sup> siècle. Nous retrouvons ici la très aristotélicienne proposition dialectique 'son en puissance' et 'son en acte', qui introduit le concept de mouvement en général. Cette distinction préalable permet de définir le type de corps susceptible de produire un son, ce que par la suite les commentateurs traduiront par 'corps sonore' ('*sonativum*'). Les corps sonores possèdent le son en puissance.

Prenons la traduction latine qui semble plus fidèle : '*Fit autem et secundum actum semper sonus alicuius et ad aliquid et in aliquo*'. C'est sans doute la phrase la plus importante pour définir la nature physique du son, c'est-à-dire que le son en acte se fait toujours de quelque chose sur quelque chose, et dans quelque chose. Aristote parle du 'milieu de propagation', sans plus de précision. On peut penser qu'il évoque l'air, propice à la propagation du son, mais qu'il envisage d'autres milieux comme l'eau, d'ailleurs il y reviendra. Cependant Barthélémy Saint-Hilaire, dans sa traduction, pense qu'il s'agit ici d'un milieu particulier au son, équivalent au diaphane pour la lumière, qui est lui-même inclus dans l'air, ou dans l'eau, c'est-à-dire dans les pores de la matière.

Le premier principe est énoncé par : '*Percussio enim est faciens*', 'car le son est produit par un choc'. Aristote développe ce principe au paragraphe suivant : 'ce n'est pas le choc de deux corps pris au hasard qui constitue le son. La laine, en effet, ne rend aucun son si on la frappe, au contraire de ce qui se passe pour l'airain et pour tous les corps lisses et creux'. Les paramètres discriminants sont très imprécis, il ne s'agit ici que de remarques de bon sens, sans aucun caractère scientifique, qu'Aristote avait déjà énoncé au paragraphe précédent sans donner plus d'explication. Pourquoi la laine n'est-elle pas un corps sonore ? Pourquoi l'airain l'est-il ? Parce qu'il est lisse. C'est un peu court. Aristote se fait un peu plus précis : 'les corps creux produisent, par répercussion, une série de chocs à la suite du premier, l'air qui a été mis en mouvement étant dans l'impossibilité de s'échapper'. En revanche dans cette phrase nous avons plusieurs idées fort intéressantes. Les corps creux sont sonores parce qu'ils répercutent une série de chocs, c'est donc que certains chocs produisent des sons trop brefs pour être perçus, et ici on joue à la fois sur la durée (plusieurs chocs consécutifs) et avec une idée d'accumulation de l'intensité sonore. Ensuite l'air a été mis en mouvement, et c'est ici une idée centrale. Pour qu'il y ait son, il faut un mouvement de l'air. Enfin cet air mis en mouvement ne doit pas s'échapper, c'est ici ce qui sans doute doit déterminer l'intensité du son.

Le deuxième principe est la nécessité de deux corps sonores au moins pour produire un son : 'ce qui résonne ne résonne que lorsqu'il est en rapport avec quelque chose'. Nous avons ici la préfiguration des notions modernes d'excitateur et de résonateur.

La conséquence de la nécessité d'un choc est l'existence d'un mouvement, parce que 'le choc n'a pas lieu sans un mouvement de translation'. Nous nous référons ici aux catégories développées par Aristote dans sa Physique<sup>71</sup>, qui classent les mouvements en trois genres, selon qu'ils concernent les changements de qualité, de quantité ou de lieu. Nous sommes ici dans la catégorie du lieu, et donc le choc de deux corps sonores est

<sup>71</sup> Aristote, *Physique*, livre III, chap. 1. Ed. A. Durand, Paris, 1862, tome 2, p 71-81.

indissociable d'un mouvement local de translation.<sup>72</sup> Ce mouvement, à l'origine du choc est à distinguer du mouvement de l'air portant le son, dont on parlera plus loin.

Le troisième principe, c'est que, quel que soit le milieu de propagation, air ou eau, le choc entre les deux corps doit s'accompagner d'un choc avec le milieu, ici avec l'air, ce qu'Aristote avait évoqué dans le paragraphe précédent : 'ce qu'il faut, c'est que se produise un choc de solides l'un contre l'autre et contre l'air'. Cette notion est très abstraite, le choc contre l'air suppose une matérialité de l'air encore peu familière au temps d'Aristote. Il s'agit en effet de suggérer que ce choc soit suffisamment violent pour se propager jusqu'à l'oreille, et, dans le même mouvement, de conserver l'empreinte, le timbre, du son initial. Le vocabulaire employé n'est pas toujours à la hauteur de l'ambition. On trouve '*percussio*' dans Thomas d'Aquin et dans les traductions de Zimara<sup>73</sup> (1540), de Scotus<sup>74</sup> (1495) et de Sophianos<sup>75</sup> (1564) commentées par Averroès, mais Argyropylus<sup>76</sup> (1500) traduit par '*ictus*': '*ictus est enim, qui sonum efficit ipsum*'. Puis '*Sed opus est, ut inter sese solidorum corporum, atque ad aerem ictus fiat*'. '*Ictus*' est beaucoup plus fort que '*percussio*', et contient une idée de violence, alors que '*percussio*' ('*per*' et '*quatio*', agiter, ébranler) est presque un terme technique évoquant à la fois un ébranlement et une impression. Mais sans doute cette traduction du terme *πληγή*, déjà rencontré chez Archytas et chez Euclide, par '*ictus*', concernant un ébranlement de l'air, a pu paraître un peu trop atomiste pour les péripatéticiens de la Renaissance.

On retrouve cette notion de violence dans le choc donné à l'air jusqu'à l'oreille dans toute la littérature de l'acoustique jusqu'au XVII<sup>e</sup> siècle. Cette approche nous semble bien disproportionnée lorsqu'on connaît l'énergie infime mise en jeu dans la production des sons.

Enfin, pour Aristote, cette condition de l'air frappé est remplie si 'l'air, une fois frappé, résiste et ne se disperse pas. De là vient qu'il doit être frappé rapidement et fortement pour résonner'. On imagine qu'Aristote cherche à distinguer ce mouvement d'air sonore du mouvement de masse d'air, courant d'air ou vent. Pour que l'air ainsi frappé résiste au choc et devienne sonore, il faut que celui-ci soit suffisamment rapide et violent, et 'doit prévenir la dispersion de l'air, comme si l'on frappait un tas ou une rangée de grains de sable se mouvant avec rapidité'. On doit comprendre qu'il existe un seuil de rapidité et de force du mouvement de l'air, au-delà duquel un son peut se produire, ce qui semble assez peu compréhensible, puisqu'un mouvement lent et faible peut très bien produire un son. On retrouve à plusieurs reprises cette idée de l'air qui résiste et ne se disperse pas. La notion de vibration n'existe pas de façon explicite chez Aristote, mais il parle de répercussions, de répétitions. D'autre part, on sait que les corps sonores sont agités de tremblements. Si l'air doit subir ces tremblements pour les propager, il est nécessaire d'imaginer cette résistance qui s'oppose à l'échappement de l'air consécutif par exemple à un mouvement de la main. Pour Aristote il faut distinguer le mouvement d'air sonore du simple courant d'air. Il entrevoit la succession de compressions et de dilatation du milieu, mais ne la décrit pas. Par ailleurs ce mouvement alternatif de l'air est continu et un, la masse d'air est unique et homogène, du corps sonore à l'oreille. On verra que certains de ses successeurs parlent de 'parties de l'air contiguës'.

Aristote traite ensuite du rôle de l'air et de l'organe de l'ouïe. Il revient alors sur les chocs à l'origine des sons :

Est-ce le corps frappé ou le corps frappant qui résonne ? C'est l'un et l'autre, mais d'une façon différente. Le son est le mouvement de ce qui peut être mu à la manière des choses rebondissantes, par les corps lisses quand on les choque. Mais tout corps frappé ou frappant ne rend pas de son, ainsi qu'on l'a dit ; et par exemple quand une pointe frappe une pointe. Il faut que le corps frappé soit mu de telle sorte que l'air en masse rebondisse et soit agité en masse.

Il existe donc pour Aristote une analogie entre le mouvement produit par le son sur l'air et le mouvement d'un objet élastique qui rebondit sur le sol. Et c'est la masse d'air qui correspond au sol. L'analogie

<sup>72</sup> Nous reviendrons sur le thème du mouvement dans le chapitre qui lui est consacré.

<sup>73</sup> *Aristotelis libri tres de anima, cum scholiis, argumentis Averrois*, Venetiis : apud Hieronymum Scotum, 1540, p 50.

L'édition de Zimara est sans doute réalisée à partir du texte de Thomas d'Aquin, issu de la traduction de Guillaume de Moerbeke. On en trouve un indice dans une erreur identique située au début du paragraphe introduisant l'étude du son : 'Nunc autem primum de sono et olfactu determinemus.' Il s'agit bien entendu de 'auditu' et non d'olfactu', et les autres éditions ont corrigé. L'édition de Sophianos est une traduction du grec, ainsi que celle d'Argyropylus.

<sup>74</sup> *Aristotelis opera* ; cum Averrois commentaria ; ed. Octavianus Scotus, Venetiis, 1495, p 306.

<sup>75</sup> *Aristotelis de anima libri tres cum Averrois commentariis*, Michaele Sophiano interprete, Venetiis apud Juntas, 1562, p 90.

<sup>76</sup> *Aristotelis tres de anima libri per Johannes Argyropylus greco in latinum traducti*, Venetiis per Jacobum de Pento de Leuco, 1500, p 39.

est intéressante car elle exprime bien l'idée de chocs répétés, ainsi que la résistance que l'air offre au mouvement, avant de le transmettre à l'oreille. Rappelons que pour Aristote c'est la masse d'air entière qui communique le mouvement sonore.

En conclusion Aristote ne semble pas très à l'aise dans le domaine de l'acoustique, et d'ailleurs il traite assez peu du sujet. En effet, en dehors de ce chapitre du *De anima*, et de quelques passages dans le *De sensu et sensibili* et dans le *De caelo* à propos du mouvement sonore des astres, il n'existe pas de texte d'Aristote traitant de la nature physique du son. Cependant Aristote a bien introduit l'étude de la production et de la propagation des sons, et ce passage du *Traité de l'âme* est incontestablement une étape qui met fin aux approximations des Présocratiques et qui ouvre des perspectives.

### Les péripatéticiens : les *Problemata* et le *De audibilibus*

On regroupe ici les auteurs faisant partie de l'école d'Aristote, et concernant l'étude physique des sons, les deux traités du pseudo-Aristote, les *Problèmes musicaux* et le *De audibilibus*. On sait que, à partir du XIII<sup>ème</sup> siècle, époque où la plupart des textes des grecs anciens provenaient de traductions arabes, de nombreux écrits ont été attribués abusivement à certains auteurs renommés comme Pythagore, Euclide ou Aristote. Lors de la grande activité scientifique arabo-musulmane des IX<sup>ème</sup> et X<sup>ème</sup> siècles, les auteurs traduisaient en arabe les textes grecs ou syriaques qu'ils pouvaient trouver, et certains de ces écrits n'étant pas authentifiés, ils en ont attribué la paternité à des auteurs qui les rendaient prestigieux<sup>77</sup>. Ces textes, et notamment ceux qui ont été attribués à tort à Aristote, ont circulé durant tout le Bas Moyen Âge, et ont été imprimés par la suite comme authentiques. C'est le cas des *Problemata*, *Problèmes d'Aristote*, qui sont des recueils de questions et réponses sur des sujets fort divers. Ce n'est qu'à la fin du XIX<sup>ème</sup> et au cours du XX<sup>ème</sup> siècle, grâce à des recherches philologiques très poussées, qu'on a pu supposer, puis démontrer leur inauthenticité, et éventuellement leur trouver une paternité. Par ailleurs, au cours des premiers siècles de notre ère, au sein du courant néoplatonicien et néopythagoricien, quelques auteurs se réclament des auteurs reconnus et n'hésitent pas à leur attribuer des textes d'origine incertaine. C'est le cas ici pour le *De audibilibus* dont nous ne connaissons l'existence que par l'extrait donné par Porphyre au III<sup>ème</sup> siècle dans son *Commentaire sur l'Harmonique de Ptolémée*. Concernant le sujet qui nous intéresse, il est frappant de constater que deux théories acoustiques différentes d'Aristote se font jour, l'une est celle développée dans le *De anima*, et l'autre, si l'on accepte la paternité de ces deux écrits, dans les *Problèmes* et le *De audibilibus*.

Le *De audibilibus*, est un court traité d'une dizaine de pages. Il est maintenant établi qu'il n'est pas l'oeuvre d'Aristote, mais sans doute d'un de ses disciples<sup>78</sup>. On pense qu'il s'agit d'un fragment d'un ouvrage plus important. Son propos est l'étude de la formation de la voix et des sons dans différents instruments à vent et à cordes. Le traité commence de cette façon :

800a - Tous les sons, qu'ils soient articulés ou non articulés, sont produits par la rencontre de corps avec d'autres corps ou de l'air avec des corps, non parce que l'air prend certaines formes, comme certains le pensent, mais parce que l'air est mis en mouvement, selon le cas, par le fait du mouvement des corps, que ce soit par contraction, expansion ou compression, ou encore d'un choc par un impact venant du souffle ou des cordes d'un instrument. Car, quand la partie d'air la plus proche est frappée par le souffle venant à son contact, l'air est immédiatement propulsé, poussant en avant de la même manière l'air conjoint, de telle façon que le son se propage sans altération aussi loin que la perturbation de l'air le permet. Aussi, bien que l'origine de la perturbation soit un point particulier, sa force est dispersée sur une grande étendue, comme les brises qui soufflent sur les fleuves ou du rivage. Les sons qui, pour quelque raison ont été étouffés à leur début, sont faibles et confus. Mais s'ils sont clairs, ils se propagent loin et remplissent tout l'espace autour d'eux.

La première objection concernant l'air qui prend certaines formes vise les 'effluves' d'Empédocle et les 'effigies' des atomistes qui sont des formes prises par les éléments porteurs d'images ou de sons. Cette idée du son, ou de la voix, qui est de l'air qui prend une certaine forme, est bien établie, encore après Aristote<sup>79</sup>. Ici c'est l'air qui porte le son dans un mouvement analogue à celui du corps sonore qui l'a engendré. On relève une grande distinction avec Aristote, ici l'air n'est pas continu et un, mais composé de parties contiguës qui propagent successivement l'ébranlement initial. La suite du traité concerne la physiologie des organes qui

<sup>77</sup> On peut se référer à ce sujet à l'article d'Ahmed Djebbar, spécialiste de la science arabe : Ahmed Djebbar, Universalité et localité dans les pratiques scientifiques des pays d'Islam, in *Alliage* 55-56, 2004.

<sup>78</sup> On l'attribue généralement à Straton de Lampsaque. Certains disent que c'est Théophraste, pour Karl von Jan, il s'agit d'Héraclide du Pont. Voir à ce sujet : Gottschalk, H.B., *The De Audibilibus and peripatetic Acoustics*, in *Hermes*, 96 (1968), p 435-461. Un consensus semble se former autour de Straton (Diels, Düring, Capelle et les traducteurs de l'édition anglaise d'Oxford).

<sup>79</sup> Notamment dans certains problèmes de la section XI des *Problemata*.

produisent la voix, les poumons, la trachée et la bouche. Ensuite les instruments à vent sont étudiés, ainsi que les lyres. C'est à ce sujet qu'une digression intéressante apparaît, qui énonce une théorie sur la propagation des sons. Ce court extrait a souvent été interprété, depuis le XIX<sup>ème</sup> siècle, comme une preuve de la découverte par Aristote de la théorie vibratoire des sons, et nous allons évaluer cette hypothèse souvent présentée comme certaine.

Sur ce texte, il existe un article un peu oublié de Thomas Young, paru dans la revue *Bibliothèque Britannique* éditée au début du XIX<sup>ème</sup> siècle à Genève, qui a sans doute été lu par de nombreux physiciens postérieurs. Alors que le jeune Young s'intéressait à la propagation de la lumière, et des sons, envisagée comme phénomène ondulatoire, il prend connaissance de ce texte sous l'angle de la théorie des vibrations encore toute récente. Après avoir cité le point de vue dominant qui attribue à Galilée la connexion entre le nombre de vibrations et la hauteur des sons, Thomas Young entreprend de montrer que c'est bien chez Aristote qu'on trouve l'exposé de cette théorie.

Comme nous ne disposons (encore de nos jours) que de peu de traductions de ce traité, Thomas Young est parti du texte grec. Voici le passage sans doute le plus important, puisqu'il expose la théorie de la propagation des sons qu'on attribuera longtemps à Aristote<sup>80</sup> :

« Le son des cordes minces est faible, et fin comme un fil, parce que le coup qu'elles donnent à l'air est d'un genre analogue; car la même vibration originale que l'air a reçue, il la transmet finalement à l'oreille; que cette vibration soit faible ou forte, douce ou dure, délicate ou grossière. Car une portion d'air mettant continuellement une autre portion (de ce fluide) en mouvement, il en résulte un son uniforme; et il en est de même sous le rapport du grave et de l'aigu; car les vitesses des coups successifs conservent l'identité des sons dès leur origine. Les vibrations communiquées à l'air par les cordes sont nombreuses et distinctes, mais leurs intervalles étant trop rapprochés pour que l'oreille puisse les apercevoir, le son paraît unique et continu. Il en est de même de certains objets visibles qui, quoique séparés, paraissent souvent contigus, lorsqu'ils sont dans un mouvement rapide. C'est ce qui a lieu dans les consonances. Car, puisque les sons d'une note sont exactement contenus dans ceux d'une autre note, et puisque leurs intermittences reviennent au même instant, les sons intermédiaires ne sont pas observés (ou plutôt sont moins observés). Car, dans toutes les consonances les impulsions données à l'air par la note la plus aiguë, sont d'autant plus fréquentes que la vitesse du mouvement de la corde est plus considérable, et la dernière des vibrations de la note aiguë frappe l'oreille en même temps que la vibration de la note grave. »

Dans l'édition commentée des *Problèmes musicaux* d'Aristote, F.A. Gevaert et J.C. Vollgraff citent un passage un peu plus court, mais correspondant au même extrait<sup>81</sup> :

Les impulsions imprimées à l'air par les cordes ont lieu nombreuses et séparées. Mais à cause de la petitesse des intervalles de temps, l'ouïe ne pouvant saisir les interruptions, le son paraît un et continu. [...] Le même phénomène se constate dans les accords. En effet, comme les deux résonances se trouvent ici être comprises les unes dans les autres, et que leurs arrêts coïncident, l'intermittence des sons se dérobe à notre oreille. Car, dans tous les accords, les secousses aériennes qui engendrent les sons aigus ont lieu en plus grand nombre, à cause de la vitesse du mouvement. Mais la terminaison des résonances rapides parvient à notre oreille en même temps que la terminaison des résonances plus lentes. De sorte que l'ouïe, ne pouvant percevoir les intermittences du son, comme il a été dit, nous croyons entendre simultanément les deux sons d'une manière continue.

Voici la traduction anglaise, à partir du texte grec édité par Prantl chez Teubner en 1881<sup>82</sup> :

803b 23 - The same thing may be seen in the case of stringed instruments ; the sounds produced from thin strings are thin and narrow and 'fine as hairs', because the impacts upon the air have only a narrow surface of origin. For the sounds that are produced and strike on the ear are of the same quality as the source of movement which gives rise to the impacts ; for example, they are spongy or solid, soft or hard, thin or full. For one portion of the air striking upon another portion of the air preserves the quality of the sound, as is the case also in respect of shrillness and depth ; for

<sup>80</sup> Thomas Young, Lettre sur les découvertes faites par Aristote sur le son, in *Bibliothèque Britannique*, Sciences et Arts, Genève, vol. XVIII, 1801, p 354-357.

<sup>81</sup> F.A. Gevaert et J.C. Vollgraff, *Les problèmes musicaux d'Aristote*, Gand, Lib. gén. Hoste, 1903, p 111-112.

<sup>82</sup> Ps-Aristote, *De audibilibus*, in *The works of Aristotle*, tome 6, trad. du grec par T. Loveday et E.S. Forster, édition Ross, Oxford, Clarendon Press, 1913, p 800-804.

the quick impulsions of the air caused by the impact, quickly succeeding one another, preserve the quality of the voice, as it was in its first origin.

Now the impacts upon the air from strings are many and are distinct from one another, but because, owing to the shortness of the intermittence, the ear cannot appreciate the intervals, the sound appears to us to be united and continuous. The same thing is the case with colours ; for separate coloured objects appear to join, when they are moved rapidly before our eyes.

The same thing happens, too, when two notes form a concord ; for owing to the fact that the two notes overlap and include one another and cease at the same moment, the intermediate constituent sounds escape our notice. For in all concords more frequent impacts upon the air are caused by the shriller note, owing to the quickness of its movement ; the result is that the last note strikes upon our hearing simultaneously with an earlier sound produced by the slower impact. Thus, because, as has been said, the ear cannot perceive all the constituent sounds, we seem to hear both notes together and continuously. 804a 8 [..]

Voici la traduction de cet extrait:

803b-23 - On peut voir la même chose dans le cas des instruments à cordes. Les sons produits par les cordes minces sont minces, étroits et fins comme des cheveux, parce que les impacts sur l'air ont seulement une surface étroite dès l'origine. Car les sons qui sont produits et qui frappent l'oreille sont de même qualité que la source du mouvement qui donne naissance aux impacts; par exemple ils sont pâteux ou solides, faibles ou forts, délicats ou pleins. En effet une partie d'air frappant une autre partie d'air préserve la qualité du son, et respecte également l'acuité et la gravité; car les impulsions rapides de l'air causées par l'impact, en se succédant rapidement l'une à l'autre, préserve la qualité de la voix, comme elle était à l'origine.

Les impacts de la corde sur l'air sont nombreux et distincts les uns des autres, mais, en raison de leur petitesse et de leur intermittence, l'oreille ne peut apprécier les intervalles, et les sons nous apparaissent comme unis et continus.

Il se passe la même chose avec les couleurs ; car des objets colorés séparés apparaissent joints quand ils sont en mouvement rapide devant nos yeux.

La même chose arrive également quand deux notes forment un accord; en raison du fait que les deux notes se chevauchent et s'incluent l'une dans l'autre et cessent au même moment, les sons intermédiaires qui le constituent échappent à notre attention. Car dans tous les accords, les impacts plus nombreux sur l'air sont causés par les notes aiguës, en raison de la rapidité de leur mouvement. Le résultat est que la dernière note frappe notre ouïe en même temps que le premier son produit par l'impact plus lent. C'est pourquoi, comme nous l'avons dit, parce que l'oreille ne peut percevoir tous les sons qui le constituent, il nous semble que nous entendons les deux notes ensemble et de façon continue.

Thomas Young parle à plusieurs reprises de 'vibrations', alors que l'auteur du texte utilise toujours le mot *πληγή* (coup). Et lorsqu'il traduit plus précisément par 'impulsions données à l'air', c'est pour dire qu'elles sont 'fréquentes' en traduction du terme *πλεονάκις* ('plus souvent', 'en plus grand nombre'). Les mots employés portent en eux un contenu qui dépasse largement le sens premier. C'est pourquoi il est inexact et anachronique de prêter à l'auteur l'évocation de 'vibrations' de l'air, et il est ambigu d'y accoler le terme 'fréquent' qui fait référence au langage de la physique des ondes. De nombreux auteurs d'ouvrages de physique du XIX<sup>ème</sup> et même du XX<sup>ème</sup> n'hésitent pas à faire d'Aristote l'inventeur de la théorie vibratoire des sons<sup>83</sup>.

Alors, pour vérifier cette proposition, revenons au texte grec, au moins pour une phrase, qui est représentative de l'ensemble<sup>84</sup> :

804a1-3 :

πλεονάκις μὲν γὰρ ἐν πάσαις ταῖς συμφωνίαις ὑπὸ τῶν  
ὑπερτέρων φθόγγων αἱ τοῦ ἀέρος γίνονται πληγαὶ διὰ τὸ  
τάχος τῆς κινήσεως\*

Traduction anglaise :

For in all concords more frequent impacts upon the air are caused by the shriller note, owing to the quickness of its movement

<sup>83</sup> Outre Thomas Young, on peut citer par exemple, Jamin, *Cours de Physique de l'Ecole Polytechnique*, 1887 (tome 3, p 9), Poggendorff, *Histoire de la physique*, 1883, p 487, ou Hoefer, *Histoire de la physique*, 1872, p 71, etc..

<sup>84</sup> *Aristotelis quae feruntur de audibilibus*..(texte grec), Carolus Prantl, Leipsig, Teubner, 1881, p 30.

Traduction à partir de l'anglais :

Car dans tous les accords, les impacts plus fréquents sur l'air sont causés par les notes aiguës, en raison de la rapidité de leur mouvement.

Traduction de Thomas Young :

Car, dans toutes les consonances les impulsions données à l'air par la note la plus aiguë, sont d'autant plus fréquentes que la vitesse du mouvement de la corde est plus considérable.

Traduction F.A. Gevaert<sup>85</sup> :

Car, dans tous les accords, les secousses aériennes qui engendrent les sons aigus ont lieu en plus grand nombre, à cause de la vitesse du mouvement.

La traduction de Gevaert semble la plus correcte. La traduction anglaise dit que *les sons aigus causent les impacts plus fréquents*, tandis que l'original dit que *les impacts qui engendrent les sons aigus sont plus fréquents*. Ce ne sont pas les sons qui provoquent les impacts, comme le dit le traducteur anglais, ce sont plutôt les impacts sur l'air, provoqués par le mouvement de la corde, qui engendrent le son. Par ailleurs on peut contester, comme on l'a vu, la traduction de *πλεονάκις*, 'en plus grand nombre', par le terme 'fréquent', anachronique mais qui convient à notre connaissance de la théorie moderne de l'acoustique. Thomas Young anticipe lorsqu'il parle de la vitesse du mouvement de la corde qui est la cause des impulsions fréquentes. Le texte parle de la vitesse du mouvement, sans expliciter s'il s'agit du mouvement de la corde, de celui de l'air, ou même du son se propageant dans l'air. Plus haut, la traduction anglaise évoque 'the quick impulses of the air caused by the impact, quickly succeeding one another'. 'Impulsions rapides' veut-il dire que le mouvement local a une vitesse instantanée élevée, ou que les impulsions se succèdent à un rythme élevé ? C'est toute la question que pose ce texte, et il faut bien prendre garde à ne pas l'interpréter avec nos connaissances actuelles. Car c'est la succession des coups à un rythme élevé qui est qualifiée de vitesse. Le texte ne parle pas ici de la vitesse du mouvement de la corde. On n'est pas encore dans l'élaboration du concept de vibration, qui n'existe donc pas comme un mouvement à part entière avec ses propres règles, mais comme une succession de petits mouvements. Il est vrai que tous les anciens qui se sont penchés sur la question de la nature physique du son savaient bien qu'il est produit par un tremblement. Mais pourquoi, justement, les textes utilisent le terme *πληγή* (coup) et n'emploient pas *τρόμος* (tremblement, vibration) qui est à disposition ? C'est qu'un tel tremblement est observé comme une succession de petits coups, d'impulsions. Et ici il convient de citer, concernant le même passage, la traduction de l'éminent helléniste Théodore-Henri Martin qui saute le pas allègrement<sup>86</sup> :

Dans tous les accords, les impulsions imprimées à l'air par le son le plus aigu ont lieu en plus grand nombre *dans le même temps*, à cause de la vitesse du mouvement.

Laissons de côté les sons aigus qui impriment les impulsions, nous en avons parlé plus haut, c'est bien entendu le contraire (les impulsions engendrent les sons aigus). Mais à aucun moment, dans le texte, il est fait mention de l'expression 'dans le même temps'. Et justement, la phrase suivante montre bien qu'on est resté dans le paradigme platonicien, puisqu'on y lit :

La terminaison des résonances rapides parvient à notre oreille en même temps que la terminaison des résonances plus lentes. De sorte que l'ouïe, ne pouvant percevoir les intermittences du son, comme il a été dit, nous croyons entendre simultanément les deux sons d'une manière continue. (trad. Gevaert)

Rappelons que dans la théorie de Platon, les sons rapides, lorsqu'ils atteignent l'oreille, ralentissent leur mouvement et sont rattrapés par les sons graves, plus lents, et leur impriment leur mouvement sans les troubler.

Il n'est donc pas ici question de 'nombre d'impulsions dans le même temps', expression qui pourrait préfigurer la notion de vibrations et de fréquence. Pourtant il semble bien qu'ici, comme dans tous les textes antérieurs qui associent la hauteur du son à la vitesse du mouvement, la vitesse représente le 'nombre d'impulsions dans le même temps', comme le dira Galilée plus tard (*numero di vibrazione sull' medesimo tempo*), mais que cette formulation ne parvient pas à s'énoncer, faute d'une représentation précise du phénomène et donc en absence du vocabulaire approprié. Cette représentation temporelle des sons n'existe pas, elle n'est pas formulée, il est donc inexact d'affirmer que les péripatéticiens avaient conçu la notion de fréquence.

<sup>85</sup> F.A. Gevaert et J.C. Vollgraff, *Les problèmes musicaux d'Aristote*, Gand, Lib. gén. Hoste, 1903, p 111-112.

<sup>86</sup> Th. Henri Martin, *Etudes sur le Timée de Platon*, Paris, Ladrangé, 1841, t 1, p 393-394.



Cette interprétation anachronique du *De audibilibus* a été souvent développée par des commentateurs modernes, à la suite Thomas Young, dans de nombreux traités de physique ou de musique du XIX<sup>e</sup> et du XX<sup>e</sup> siècle.

Pourtant F. A. Gevaert et J.C. Vollgraff avaient bien vu le problème lorsqu'ils disent<sup>87</sup> :

[...] Aristote ignorait le vrai mécanisme des vibrations sonores. Il ne savait pas que chaque secousse aérienne entendue isolément est aphone, et que la hauteur du son est simplement la résultante sensorielle du degré de vitesse momentanément donné aux secousses aériennes. Dans son idée chaque impulsion de l'air fait entendre le son intégral.

Toutefois ils énoncent une inexactitude, la vitesse instantanée, ce qu'on peut comprendre de la formule 'degré de vitesse momentanément donné aux secousses aériennes', ne détermine pas la fréquence, car elle dépend également de l'amplitude du mouvement pour une fréquence donnée, elle-même déterminée par des paramètres physiques fixes.

H.-B. Gottshalk, dans un article publié en 1968, entreprend une remarquable synthèse des différentes suppositions concernant la paternité de ce traité péripatéticien. Toutefois, dans son interprétation du *De audibilibus*, il commet la même inexactitude anachronique en considérant la théorie des coups répétés développée ici comme une théorie des vibrations ('vibration-theory'), dont il emploie le langage ('frequency'), inadapté dans ce cas.

De même, dans *l'Histoire Générale des Sciences*, publiée sous l'autorité de René Taton en 1957, et plusieurs fois rééditée, dans les très rares pages consacrées à l'acoustique physique (une quinzaine sur les 2000 pages qui concernent les sciences de l'Antiquité au XIX<sup>e</sup> siècle..), les historiens Paul-Henri Michel et Pierre Louis n'hésitent pas à affirmer :

[...] c'est à l'école péripatéticienne (et à Aristote lui-même, s'il est l'auteur du *περι ακουστων* [De audibilibus]) que revient le mérite d'avoir, par une observation plus attentive, reconnu que tous les sons, aigus ou graves, se propagent à la même vitesse, en vibrations isochrones, dont la fréquence seule varie selon l'acuité.

Et d'ajouter même :

Cette théorie nouvelle était déjà acceptée à l'époque où Aristoxène écrivait son traité d'Harmonique.

En dépit de tout le respect qu'on doit à ces éminents historiens, ils est impossible de trouver dans le texte, même en le décodant avec la plus grande perspicacité, aucune allusion à la vitesse de propagation des sons, ni aux vibrations isochrones, et encore moins à leur fréquence. Encore une fois, l'auteur du *De audibilibus* parle de succession de coups dont le nombre est lié à la hauteur. A aucun moment il n'est question de durée, et c'est le paramètre essentiel de la notion de vibration, comme Galilée saura le percevoir. Une vibration n'est pas une succession de coups, c'est un mouvement qui obéit à des lois physiques particulières, et il n'est pas question ici de ce type de mouvement, même si, après l'acquisition des connaissances actuelles, il est satisfaisant pour l'esprit d'en trouver les inventeurs le plus loin possible.

En conclusion de cette approche sémantique, on peut dire que la vitesse évoquée ici ne correspond pas à la vitesse instantanée du mouvement du corps sonore ou de l'air contigu, ni à la vitesse de propagation du son. La vitesse du mouvement qui provoque la hauteur du son est la 'vitesse de récurrence', le rythme auquel les impulsions sont soumises. Mais comme il s'agit ici de succession de coups, considérés comme des 'parties' de son qui se succèdent, séparées par des silences trop brefs pour être perçus, on ne peut pas parler de préfiguration de la notion de fréquence, qui est la caractéristique d'un mouvement bien particulier, la vibration.

L'auteur du *De audibilibus* n'a pas développé une théorie des vibrations sonores. Il a observé que les sons étaient des coups portés sur l'air par les tremblements du corps sonore, que ces coups sonores étaient espacés de silences imperceptibles, et que lorsqu'ils étaient nombreux, le son produit était aigu.

## **Les chocs sur l'air dans les instruments à vent et dans la voix**

Si la théorie des chocs peut parfaitement s'appliquer à la production de bruits, de façon un peu moins directe pour les cordes tendues, elle est plus délicate à utiliser lorsqu'il s'agit de la voix ou des instruments à vent. En effet on retrouve dans tous les textes qui traitent de la nature physique des sons une démarche commune. On parle d'abord des bruits engendrés par des chocs, puis on aborde les sons, et la théorie se fonde

<sup>87</sup> *Idem*, p.112.

souvent à ce moment sur les cordes vibrantes. Il en sera de même au XVII<sup>ème</sup> et XVIII<sup>ème</sup> siècles. L'étude des vibrations des cordes permet une certaine visualisation du phénomène, on voit les mouvements de la corde, et le modèle du 'canon' ou monocorde avec sa loi de proportionnalité constitue un socle stable d'expérimentation. Le mouvement de la corde permet une représentation du phénomène qui se produit dans l'air, un mouvement analogue, avec toutes les imprécisions induites par cette notion. En revanche les sons engendrés par l'air, que ce soit dans des tubes ou dans des sifflets, ou dans les deux comme pour la voix humaine, sont bien plus complexes à modéliser. La loi des sons produits par des chocs est beaucoup moins évidente dans ce cas, les mouvements sont imperceptibles, et il faut lui apporter quelques amendements.

Dans le *De anima*, Aristote parle un peu de la voix, après son exposé sur le son, au chapitre 8 du livre II. Quant à Aristoxène, il n'en parle que pour distinguer la voix continue (le discours) de la voix discontinue (le chant) qui seule trouve un intérêt à ses yeux, mais il enseigne l'harmonie, pas la physique. Le texte le plus important concernant l'étude physique des instruments à vent et de la voix est, encore une fois, le *De audibilibus*.

Néanmoins, on trouve des allusions aux sons produits par les tubes dans quelques fragments des Présocratiques. Ainsi, Théon de Smyrne<sup>88</sup> (I<sup>er</sup> siècle) raconte que le pythagoricien Lasos d'Hermione, avait fait des expériences sur des vases plus ou moins remplis d'eau qui rendaient des sons de hauteurs différentes en proportion avec les nombres déterminant les intervalles de quarte, de quinte et d'octave. On ne produisait pas les sons en frappant les vases, comme le pensait Théon, mais en soufflant sur le bord, comme sur les flûtes de Pan.

Dans le fragment du texte d'Archytas cité par Porphyre, on trouve également des exemples de sons produits par des instruments à vent<sup>89</sup> :

[...] Prenons encore un autre exemple, celui des flûtes : le souffle qui sort de la bouche produit, en s'échappant par les trous proches de l'embouchure, les notes plus aiguës parce que le souffle émis y est plus intense que celui qui s'échappe des trous les plus éloignés, d'où sortent, pour cette raison, les notes plus graves.

[...] Cela est encore vrai du roseau: si l'on souffle dans un roseau dont on a bouché la partie inférieure, il en sortira un certain son (grave); et si on le bouche jusqu'à la moitié ou à n'importe quel autre endroit, le son sera aigu. Car le même souffle manque de force quand il a parcouru un long trajet, alors qu'il reste fort après un trajet court.

Archytas tente de démontrer que le son aigu est le résultat d'un souffle puissant qui, en s'affaiblissant avec la distance, produit un son grave. Concernant la voix, Archytas tente la même démarche, avec moins de succès<sup>90</sup> :

[...] quand, en parlant ou en chantant, nous voulons produire un son puissant et aigu, nous donnons de la voix par un souffle violent.

[...] On retrouvera la même chose avec les sons de la voix: si le souffle est vigoureux, les sons sont puissants et aigus; si le souffle manque de force, ils sont faibles et graves. Nous pourrions encore nous en convaincre par la preuve suivante, très solide: quand quelqu'un parle fort, on peut l'entendre même de loin; mais qu'il parle doucement, et on ne l'entendra pas même de près.

Il est clair qu'ici Archytas se fourvoie dans la confusion entre l'intensité et la hauteur des sons produits par la voix, dans un passage où il cherche des exemples pour démontrer la relation entre vitesse et hauteur. Les deux domaines d'investigation des recherches d'Archytas sont l'espace, et les dimensions des instruments, et la puissance mise en jeu, la force du souffle. On retrouve à cette époque à peu près le même paradigme dans les recherches concernant le mouvement, étude des longueurs de trajectoires et violence du mouvement qui décroît avec la distance.

Pour Aristote, le son est un certain mouvement de l'air, et la voix est liée à la respiration. En effet, le son est le résultat d'un choc de quelque chose sur l'air, donc la voix a besoin d'un air particulier, mis en contact percussif avec une surface<sup>91</sup> :

[...] puisque toute chose sonore émet des sons, par le choc de quelque chose contre quelque chose et en quelque chose, qui est l'air, il est rationnel que seuls possèdent la voix les êtres qui reçoivent l'air en eux.

<sup>88</sup> Theon de Smyrne, *Exposition des connaissances mathématiques utiles pour la lecture de Platon*, traduction du grec au français J. Dupuis, Paris, Hachette, 1892, chap. VI, p 97.

<sup>89</sup> Archytas, cité par Porphyre, in Hermann Diels, *Die Fragmente der Vorsokratiker*, trad. française par J.P. Dumont, Les présocratiques, Gallimard, Paris, 1988, p 533-535.

<sup>90</sup> *Ibidem*.

<sup>91</sup> Aristote, *De anima*, livre II, chap. 8.

Ce qui explique que les animaux qui ne respirent pas n'ont pas de voix. Et plus loin, Aristote explique :

La voix est ainsi le choc de l'air respiré contre ce qu'on appelle la trachée-artère, et ce choc est produit par l'âme qui réside dans ces parties du corps.

La voix résulte donc du choc de l'air respiré sur la trachée, ce qui convient à la théorie exposée plus haut. Il convient de noter que la voix humaine, pour Aristote, est guidée par l'âme qui en dicte le contenu, ce qui n'est pas le cas quand on tousse, ou quand les animaux, dépourvus d'âme, poussent leur cri. Et Aristote conclut<sup>92</sup> :

Et la preuve, c'est que nous ne pouvons parler ni pendant l'inspiration, ni pendant l'expiration, mais seulement quand nous retenons notre respiration : car les mouvements se font avec l'air ainsi retenu. On voit clairement aussi pourquoi les poissons sont aphones : c'est qu'ils ne possèdent pas de larynx, et ils ne possèdent pas cette partie du corps parce qu'ils ne reçoivent pas l'air en eux, ni ne respirent.

Il s'agit donc, dans la voix et dans les instruments à vent, de modeler l'air contenu dans l'instrument de telle façon qu'il imprime au corps qui le délimite une percussion qui produit un son analogue aux mouvements donnés à l'air confiné.

Dans le *De audibilibus*, on traite longuement des organes de la voix, et des différents instruments à vent, de façon très descriptive et pratique. C'est ainsi qu'on y parle des qualités de souplesse et de dilatation des poumons, des dimensions de la trachée, et de l'humidité présente. Pour les instruments à vent, les aulos et les cornes, on décrit les anches, de la forme des cornes et de leur préparation, et on disserte sur l'âge des animaux dont elles proviennent. A chaque fois qu'il est question du son les termes 'chocs sur l'air' sont employés, de façon banalisée, ce qui montre à quel point cette approche était ordinaire à cette époque (III<sup>e</sup> siècle av. J.-C.). Une intéressante digression est faite à l'occasion de la propagation des sons en ligne droite<sup>93</sup> :

Le fait que la direction que prend le son suit une ligne droite est illustré par la pratique des charpentiers qui éprouvent les poutres et les grands troncs en général. En effet, lorsqu'il frappent à une extrémité, le son se propage de façon continue à l'autre extrémité, à moins que le bois ne présente quelque défaut; si c'est le cas, le son se propage jusque là, puis cesse et se disperse. Il contourne le nœud dans le bois et ne peut plus se propager en ligne droite.

Cette théorie de la propagation en ligne droite, 'prouvée' ici, est en contradiction avec celle qui s'exprime à la même époque chez les stoïciens qui introduisent la notion de propagation circulaire, comme on le verra plus loin. Cependant c'est la première fois que la propagation du son dans les solides est évoquée dans un texte savant, même si, en effet, le fait est bien connu des travailleurs du bois. A ce propos il est curieux de constater à quel point les philosophes de l'Antiquité étaient éloignés des connaissances empiriques des nombreux artisans de leur époque, que ce soit comme ici des charpentiers, ou des luthiers et facteurs d'instruments. La connaissance de la physique des sons aurait sans doute beaucoup progressé par la fréquentation des ateliers. Mais cette remarque peut s'appliquer à d'autres époques pas si lointaines..

## **Les chocs sonores dans les textes de l'Antiquité tardive et du Moyen Âge**

On retrouve le thème du choc sur l'air à l'origine du son dans de nombreux textes traitant en général de la théorie harmonique, souvent dans les premières pages, lorsqu'il faut définir la nature du son. C'est ainsi que Vitruve évoque l'air frappé, au début du chapitre 3 du livre V de son *Traité d'architecture*.

Dans le Manuel d'harmonique de Nicomaque de Gêse (II<sup>e</sup> siècle), on trouve la définition suivante<sup>94</sup> :

Nous disons d'une manière générale que le bruit est une percussion indivise de l'air qui parvient jusqu'au sens auditif [...]

On trouve également dans Plutarque une définition semblable<sup>95</sup> :

C'est un air frappé, sensible et perceptible à l'ouïe [...]

<sup>92</sup> *Ibidem*.

<sup>93</sup> Ps-Aristote, *De audibilibus*, in *The works of Aristotle*, tome 6, trad. du grec par T. Loveday et E.S. Forster, édition Ross, Oxford, Clarendon Press, 1913, p 800-804.

<sup>94</sup> Nicomaque de Gêse, *Manuel d'harmonique*, trad. C.E. Ruelle, Paris, Baur, 1881, chap. IV.

<sup>95</sup> Plutarque, *Oeuvres morales, De la musique*, trad. Amyot, Paris, 1572, p. 660.

Un peu plus tard, Aristide Quintilien se fait plus précis, en exposant deux conceptions nuancées de ces chocs<sup>96</sup> :

Certains ont dit que le son est de l'air frappé; d'autres, un choc porté à l'air. Les premiers définissent le son comme l'élément même qui est affecté; les autres, et c'est mieux, comme la modification subie par cet élément.

Cette nuance constitue un progrès important, le son n'est plus seulement le choc, c'est la perturbation communiquée à l'air et qui se propage. Ptolémée, dans les premières lignes de ses *Harmoniques*, reprend cette définition, 'le son est une modification subie par de l'air frappé'. En envisageant le son, non plus comme la percussion qui en est l'origine, mais comme une perturbation du milieu, on dépasse Aristote, et on contourne la difficulté qu'il rencontre dans sa définition imprécise du mouvement du son.

Boèce, au début du VI<sup>ème</sup> siècle, dans *Institutione Musica* semble ne pas avoir bien assimilé cette nuance, et définit le son comme 'un choc de l'air qui se transmet sans perte jusqu'à l'ouïe'<sup>97</sup> (*Percussio aeris indissoluta usque ad auditum*).

Cependant Boèce décrit avec précision et une certaine intuition la production des sons d'une corde tendue<sup>98</sup> :

Il ne faut pas croire qu'un seul son est émis chaque fois que la corde est frappée ou qu'il n'y a, dans ces vibrations, qu'un seul choc : l'air est frappé autant de fois que la corde l'a percuté en vibrant. Or puisque les vitesses des sons sont reliées entre elles, l'oreille ne perçoit aucune interruption et un son unique parvient à l'organe des sens, grave ou aigu, quoique l'un et l'autre soient formés de plusieurs vibrations, le grave de vibrations plus lentes et plus espacées, l'aigu de vibrations plus rapides et rapprochées. Si l'on fabrique avec soin un cône - que l'on nomme un 'fuseau' - et que l'on y trace un petit trait de couleur, rouge ou autre, et qu'on le fait tourner sur lui-même aussi vite que possible, alors le cône tout entier semble teinté de rouge, non pas qu'il soit devenu entièrement rouge, mais parce que le mouvement rapide du trait rouge recouvre les parties vierges et ne leur permet pas d'apparaître.

Il est dommage que dans cette traduction, très agréable par ailleurs, on utilise de façon anachronique le terme 'vibration' qui n'existe pas dans le texte original (sauf dans la phrase 'l'air est percuté autant de fois que la corde l'a percuté en vibrant', *quotiens eum chorda tremebunda percusserit*). Les termes utilisés sont *sonus* ou des pronoms qui reprennent *velocitates sonorum*). Dans ce passage, Boèce explique que chaque mouvement de la corde produit un choc sur l'air, et cette idée, issue du *De audibilibus* de Straton-Aristote, est bien mieux appréhendée ici. La comparaison avec le cône coloré en rotation donne une bonne idée de l'impression de continuité perçue de ces chocs successifs.

Environ un siècle plus tard, Isidore de Séville, plus grammairien que musicien, dans le chapitre consacré à la musique de son *Etymologiarum* inspiré par Cassiodore, donne une définition de la voix avec une précision étymologique curieuse<sup>99</sup> :

Vox est aer spiritu verberatus, unde et verba sunt nuncupata.

qu'on peut traduire par :

La voix est de l'air fouetté par un souffle, d'où l'appellation 'verbe'.

Il est peu probable que l'origine du mot *verbum* soit associée à la notion de percussion accompagnant la production d'un son. L'approche physique commence à s'émousser au cours de cette époque où les connaissances se transmettent de façon approximative. Raban Maur, vers 840, reprendra mot pour mot la phrase d'Isidore de Séville<sup>100</sup>.

## **Le modèle 'percussif' de la propagation des sons**

Vers la fin de l'époque classique en Grèce, on dispose d'un modèle pertinent concernant la propagation des sons. Si on fait la synthèse des textes d'Aristote, de ses disciples, d'Euclide, et en faisant des hypothèses sur ceux qui ne nous sont pas parvenus, on obtient une représentation des sons fondée sur une succession de percussions sur l'air engendrées par des chocs et qui mettent en mouvement des parties conjointes de l'air. La densité de ces petits mouvements, séparés par des instants de repos imperceptibles en raison de leur faible durée, détermine la hauteur des sons, leur ampleur l'intensité. Ces petits mouvements, ces chocs sur l'air, sont des

<sup>96</sup> Aristide Quintilien, *La musique*, trad. Fr. Duysinx, Liège, Droz, 1999, livre I, p. 26.

<sup>97</sup> Boèce, *De institutione musica*, trad. C. Meyer, Turnhout, Brepols, 2004, liv. I, chap. 3, p. 35.

<sup>98</sup> *Id.* p. 37.

<sup>99</sup> Isidore de Séville, *Etymologiarum*, lib. III, cap. XX.

<sup>100</sup> Raban Maur, *De rerum naturis*, lib. XVIII, 4 : De musica et partibus eius.

'éléments' de son, porteurs de l'information de timbre. Il est important de ne pas faire de rapprochement avec la théorie vibratoire qui suppose un mouvement particulier, périodique et donc dépendant du temps, qui obéit à ses propres règles, et dont les paramètres déterminants sont la fréquence, la phase et l'amplitude. La combinaison de ces paramètres détermine le timbre, et la vitesse de propagation du phénomène est constante dans des conditions atmosphériques données. Nous ne sommes pas du tout dans ce contexte, ce serait faire preuve d'interprétation anachronique et anhistorique que de prétendre que les philosophes de l'Antiquité avaient découvert une théorie vibratoire des sons. Le son est, pour les Anciens, une succession de chocs à un rythme plus ou moins rapide, lié à la hauteur. On a vu que les savants du Moyen Âge reprennent les théories développées par les Anciens sans y apporter d'éléments nouveaux. A la Renaissance et au début de la Science Moderne, l'approche physique du phénomène sonore est très souvent associée à cette idée de percussion de l'air qui parvient à l'oreille.

## 4 - Le son est mouvement

### **Le mouvement du son chez les Anciens**

Chez les Anciens, l'étude du son est presque anecdotique. Outre Pythagore et sa célèbre expérience des marteaux de forgeron, qui introduit sa théorie des intervalles et des consonances, on peut trouver dans le *Timée* de Platon trois extraits qui proposent une explication du phénomène sonore. Il semble que Platon ait été inspiré par son aîné Archytas, disciple de Philolaos, lui-même élève de Pythagore. On trouve quelques citations d'Archytas dans la littérature du début de notre ère, notamment chez Porphyre, dans les *Commentaires des Harmoniques de Ptolémée*. Archytas y développe assez longuement une théorie physique du son qui semble refléter l'approche de l'époque en la matière.

Aristote, a écrit sur le mouvement dans la *Physique*, et traite de la propagation des sons dans le traité *De l'âme*. On trouve également quelques commentaires dans le traité *Du ciel*, dans l'*Histoire des animaux*, ainsi que dans les *Topiques*. Le petit texte intitulé *De audibilibus* longtemps attribué à Aristote n'est pas de sa main, mais sans doute de Straton.

La nature du son est également évoquée, plus ou moins largement chez d'autres auteurs de l'antiquité romaine. Lucrèce, dans le *De rerum natura* tente une modélisation atomiste, selon la doctrine d'Epicure. En opposition à cette théorie, Sénèque traite de la nature du son au livre II des *Questions Naturelles*, à l'occasion de son étude de la foudre et du tonnerre. Dans un tout autre domaine, Vitruve, dans son *Traité d'architecture*, expose une théorie assez complète de la nature du son et propose quelques solutions techniques. Enfin Plutarque dans un texte curieux extrait des *Symposiaques* (ou *Propos de table*), qui relate une discussion entre plusieurs personnes au sujet de la propagation nocturne des sons, expose plusieurs théories qui correspondent à autant de positions sur l'échiquier des partis pris scientifiques du début de notre ère. Dans le même esprit, Aulu Gelle fait un bref résumé des différentes théories en présence, dans les *Nuits attiques*, qu'il conclut par cette citation d'un ver du *Néoptolème* d'Ennius : "Il est bon de philosopher quelquefois, mais pas toujours", ce qui exprime bien le désarroi des savants devant la difficulté d'appréhender un phénomène difficile à observer.

### **Archytas**

Archytas, on l'a vu, est sans doute le plus ancien auteur dont un texte sur le son nous soit parvenu. Après avoir développé la théorie de la production des sons, il expose la théorie de sa propagation<sup>101</sup> :

Maintenant, pour ce qui est des sons que nous percevons, les uns paraissent aigus: ce sont ceux que produit le heurt rapide et violent; les autres nous semblent graves : ce sont ceux que produit le choc lent et faible. Si, en effet, on donne avec une baguette un coup faible et léger, le choc produira un son grave, alors que si le coup est rapide et fort, le son sera aigu. Mais ce n'est pas là la seule occasion que nous ayons de nous rendre compte de ce phénomène : quand, en parlant ou en chantant, nous voulons produire un son puissant et aigu, nous donnons de la voix par un souffle violent [...]. C'est le même phénomène qui se rencontre avec les projectiles : ceux qu'on lance vigoureusement portent loin, tandis que ceux qu'on lance mollement, portent court. L'on constate aussi que l'air cède davantage quand on les lance vigoureusement que lorsqu'on les lance mollement. On retrouvera la même chose avec les sons de la voix: si le souffle est vigoureux, les sons sont puissants et aigus; si le souffle manque de force, ils sont faibles et graves. Nous pourrions encore nous en convaincre par la preuve suivante, très solide: quand quelqu'un parle fort, on peut l'entendre même de loin; mais qu'il parle doucement, et on ne l'entendra pas même de près. Prenons encore un autre exemple, celui des flûtes : le souffle qui sort de la bouche produit, en s'échappant par les trous proches de l'embouchure, les notes plus aiguës parce que le souffle émis y est plus intense que celui qui s'échappe des trous les plus éloignés, d'où sortent, pour cette raison, les notes plus graves.

De toutes ces constatations il ressort clairement qu'un mouvement rapide produit un son aigu, et un mouvement lent un son grave. Mais prenons encore le cas des rhombes qu'on fait vibrer au cours des fêtes mystiques. Si on les fait vibrer doucement, ils rendent un son grave, et un son aigu, si on les fait vibrer vigoureusement. Cela est encore vrai du roseau: si l'on souffle dans un roseau dont on a bouché la partie inférieure, il en sortira un certain son (grave); et si on le bouche jusqu'à la moitié ou à n'importe quel autre endroit, le son sera aigu. Car le même souffle manque de force quand il a parcouru un long trajet, alors qu'il reste fort après un trajet court.

On retire de ce texte deux idées qui proviennent de la notion de violence. La première, c'est que la violence du coup initial, qui produit le son, détermine l'intensité. Et comme Archytas propose un modèle presque balistique de la propagation du son, il en conclut, naturellement, que la violence initiale détermine la

<sup>101</sup> Cité par Porphyre, Commentaire sur les Harmoniques de Ptolémée, éd. Düring, p. 56.

distance de perception, assimilée à la trajectoire du projectile. Mais Archytas entretient, en second lieu, une certaine confusion, parce que la violence établit également la hauteur de son, car l'énergie d'émission est liée à la vitesse. On voit ici apparaître la grande idée des Présocratiques sur la propagation des sons, la vitesse détermine la hauteur de son. Cet assemblage, violence du choc, distance de perception, vitesse de propagation et hauteur de son, trouve sa justification dans quelques exemples choisis par Archytas.

C'est ainsi que le choc d'une baguette fait le son aigu ou grave selon la violence, la voix puissante le fait aigu et portant loin, le souffle intense dans une flûte produit un son aigu, et les rhombes agitées vigoureusement également. La preuve par l'exemple est donc faite que la vitesse, elle-même dépendant de la violence initiale entraîne l'acuité, et accessoirement la distance de perception. Une quantité de contre exemples auraient pu lui être opposés, mais il est probable que la pratique instrumentale n'était pas fréquente chez les philosophes qui ne retenaient de la réalité que des situations choisies. Porphyre, dans son commentaire du texte qu'il ne livre pas entièrement, conclut<sup>102</sup> :

Archytas ajoute encore d'autres précisions touchant le fait que le mouvement sonore est fonction des intervalles, et résume son propos en ces termes : " les sons aigus sont animés d'un mouvement rapide et les graves d'un mouvement lent; des observations nombreuses nous en apportent l'évidence."

Cette notion de mouvement dans le son est probablement très ancienne, et elle est acceptée de façon plus intuitive que pour la lumière. La comparaison avec les projectiles lancés vient presque naturellement à l'esprit. Le mouvement implique une idée de vitesse, mais pas comme on l'envisage à l'époque moderne, ni même chez Aristote. La vitesse, on le voit, est ici synonyme de violence, elle ne fait pas intervenir le temps, qui est une grandeur quasiment ignorée de la pensée physique antique. Et en effet, il est alors légitime d'associer la vitesse à la hauteur de son. Le mouvement du souffle dans la flûte perd sa vitesse, ou plutôt sa vigueur, et donc fait le son plus grave lorsque l'air sort par les trous éloignés. Pendant toute l'Antiquité on ne parlera pas du temps de propagation du son, ni donc de la célérité du son (comme on le dit de nos jours). C'est une idée qui ne parvient pas à émerger. Et longtemps après Archytas on dira que c'est la vitesse qui détermine l'acuité du son.

## Platon

Dans le *Timée*, Platon définit le son "comme un coup donné par l'air à travers les oreilles au cerveau et au sang et arrivant jusqu'à l'âme." Le son n'existe donc que dans le corps, qui le reçoit des corps sonores d'une façon que Platon n'explique pas. "Le mouvement qui s'ensuit, lequel commence à la tête et se termine dans la région du foie, est l'ouïe." Le mouvement est consécutif au coup donné par l'air, et n'existe pas en tant que mouvement de l'air. L'air est considéré comme le 'moteur' du mouvement sonore intérieur, et comme un corps entier. "Ce mouvement est-il rapide, le son est aigu ; s'il est plus lent, le son est plus grave ; s'il est uniforme, le son est égal et doux ; il est rude dans le cas contraire ; il est fort grand, lorsque le mouvement est grand, et faible, s'il est petit."<sup>103</sup> Comme ce mouvement doit être le vecteur d'informations sur les caractéristiques du son, la fréquence, le timbre et l'intensité, Platon, comme Archytas, associe la vitesse, caractéristique perceptible du mouvement, à la hauteur, le timbre à la 'forme' et l'amplitude du mouvement à l'intensité sonore. Platon, qui n'est pas physicien, ne se préoccupe pas de la production des sons, ni de sa propagation. Mais on sait, par l'expérience, que les sons sont produits pour la plupart, par des chocs ou des frottements de deux corps, et que les mouvements qu'ils communiquent à l'air sont propagés jusqu'à l'oreille. C'est ce qu'Aristote va exposer dans une étude plus rigoureuse du phénomène.

Le troisième passage du *Timée* traite des consonances, attribuées par Platon aux différences de vitesse qui permettent dans certains cas, la coïncidence de leurs rencontres à la fin du mouvement<sup>104</sup> :

Car les sons plus lents atteignent les mouvements des sons plus rapides qui les précèdent, quand ceux-ci commencent à s'arrêter et sont tombés à une vitesse pareille à celle avec laquelle les sons les plus lents se rencontrent ensuite avec eux et leur impriment leur mouvement ; mais quand ils les rattrapent, ils ne les troublent pas en leur imposant un mouvement différent ils y ajoutent le commencement d'un mouvement plus lent, en accord avec celui qui était le plus rapide, mais qui tire à sa fin, et du mélange de l'aigu et du grave, ils produisent un effet unique et procurent ainsi du plaisir aux ignorants et de la joie aux sages, qui voient dans des mouvements mortels l'imitation de l'harmonie divine.

On comprend, par cet extrait, que pour Platon le mouvement contient deux significations, l'une qui est le déplacement, et l'autre la forme. Concernant le déplacement, les sons aigus, plus rapides, ralentissent à un moment et sont alors rattrapés par les sons graves, plus lents. Lors du mélange qui suit, les sons graves et aigus

<sup>102</sup> Porphyre, *Commentaires sur les Harmoniques de Ptolémée*, ed. Düring, p 56.

<sup>103</sup> Platon, *Timée*, Ed. E. Chambry, 67b-67c, Garnier Flammarion, Paris, 1969, p 445.

<sup>104</sup> *Idem*, p.457.

gardent leur forme et constituent un effet unique, un 'accord' en langage musical. L'explication est également astucieuse car elle permet la compréhension du phénomène de sympathie entre fréquences harmoniques, produites lorsque par exemple une corde grave fait sonner une autre corde à l'octave, ce que tous les instrumentistes constatent. Mais Platon esquivait le problème de la propagation du son dans l'air, lorsqu'il évoque auparavant "les sons rapides ou lents, aigus ou graves, tantôt dissonants, parce que *les mouvements qu'ils produisent en nous* sont dissemblables, et tantôt consonants, parce que ces mouvements sont semblables". Les mouvements sont bien *en nous*, ce qui laisse un peu de flou dans la description, et surtout évite le problème du temps de propagation du son dans l'air égal pour toutes les hauteurs de son. Aristote va également buter sur ce problème et s'en tirera d'une phrase presque énigmatique.

## Aristote

L'étude du son chez Aristote tient en un chapitre du second livre du *De anima*. Aristote y explique la production du son, les matériaux sonores, le rôle de l'air, l'écho, l'audition et les différentes sortes de son. Nous avons vu comment Aristote explique la production des sons à partir des chocs, et comment l'oreille les perçoit. C'est sans doute l'explication de la propagation des sons qui pose le plus de problèmes à Aristote, et notamment la nature de son mouvement<sup>105</sup> :

[...] De plus le son est entendu dans l'air et aussi dans l'eau, quoique moins distinctement. Toutefois la condition déterminante du son n'est ni l'air, ni l'eau: ce qu'il faut, c'est que se produise un choc de solides l'un contre l'autre et contre l'air. Cette dernière condition est remplie, quand l'air, une fois frappé résiste et ne se disperse pas [...]

On dit avec raison que le vide est la cause déterminante de l'audition, car, dans l'opinion commune, le vide c'est l'air, lequel est bien la cause efficiente de l'audition, quand il est mû comme une masse continue et une. Mais, en raison de sa friabilité, il ne rend aucun son, à moins que le corps frappé ne soit lisse: l'air devient alors un, grâce en même temps à la nature de la surface; car la surface du poli est une. Est donc sonore le corps capable de mettre en mouvement une masse d'air, laquelle est une par continuité jusqu'à l'organe de l'ouïe. [...]

Ainsi donc, en lui-même, l'air est silencieux parce qu'il s'émiette facilement; mais quand il est empêché de s'émietter, son mouvement est un son. [...]

Le son est un mouvement, de ce qui peut être mû de la même façon que ces balles qui rebondissent sur les surfaces polies quand on les lance avec force. Ainsi, comme nous l'avons indiqué ce n'est pas que tout corps émette un son quand il est frappé ou frappant: il n'y aura pas de son, par exemple, si une aiguille frappe une aiguille. Ce qu'il faut, c'est que le corps frappé soit plan, de telle sorte que l'air rebondisse et vibre en une seule masse.[...]

En effet, il faut concilier plusieurs principes apparemment incompatibles. Si Aristote dit bien que le choc initial s'accompagne nécessairement d'un mouvement de translation, ou mouvement local, il ne dit rien sur le mouvement du son lui-même. Le mouvement, notion très importante chez Aristote, qu'il développe longuement dans sa *Physique*, est une transition, une combinaison ou une coexistence momentanée de l'être en puissance et de l'être en acte. Le mouvement (κίνησις, kinésis) est une transformation qu'Aristote classe dans l'une des quatre sortes, selon le genre (la catégorie) auquel elle s'applique : la substance, la qualité, la quantité et le lieu. La transformation de substance, c'est la génération et la corruption, et celle de la quantité c'est l'accroissement et la diminution. La transformation de la qualité ('ἀλλοιωσις, alloiôsis), c'est la transformation selon les quatre éléments et selon leurs qualités (terre = froid et sec, eau = froid et humide, air = chaud et humide et feu = chaud et sec). Enfin la transformation selon le lieu, c'est ce qu'on appelle le 'mouvement local' (φορά, phora), qui s'accompagne d'un transport de matière.

Ici, dans la production du son, Aristote établit une corrélation entre le mouvement de translation des corps sonores et le mouvement de l'air conjoint qui lui est consécutif. Le son devrait donc être pour Aristote un mouvement d'air, l'air est poussé par le corps sonore, de façon analogue à son mouvement. Aristote insiste, et ses commentateurs également, sur le fait qu'il est nécessaire, pour produire un son, que l'air ne se divise pas, et que le mouvement excitateur soit plus rapide que le mouvement de l'air, afin de prévenir la dispersion de l'air. Cette condition, délicate à appliquer dans toutes les situations, est nécessaire pour justifier l'existence de mouvement d'air non sonores. Il s'agit d'un mouvement particulier, différent du vent ou du simple courant d'air, puisque, comme le diront ses disciples, c'est un mouvement alternatif, une vibration dirait-on de nos jours. Pour Aristote, c'est clair, l'air ne se disperse pas, il résiste, et il est en masse continue jusqu'à l'oreille, donc le mouvement se transmet instantanément, du corps sonore à l'oreille. On n'évoque pas ici la compressibilité et

<sup>105</sup> Aristote, *De anima*, II, 8.



l'élasticité de l'air, encore moins la durée du phénomène. On est bien ici en présence du problème central de la conception de la propagation du son chez Aristote.

Aristote dit que dès que le son est produit par le choc, il devient un son en acte. Selon sa conception, lorsque l'être devient 'en acte', le mouvement est alors achevé, et donc, si le son devient en acte dès sa production, il n'y a pas de temps lié à ce mouvement. Ce qui pour Aristote ne convient pas pour un mouvement local, mais qui est possible lorsqu'il s'agit d'un mouvement de qualité (ἁλλοιωσις, alloiôsis), lequel peut être instantané. Mais Aristote n'utilise pas ce mot dans le *De anima*, il se limite au terme général κίνησις<sup>106</sup>. Par ailleurs ce serait nier le temps de propagation du son, mais Aristote n'en parle pas ici. Et si ce mouvement est un alloiôsis, alors comment se propage-t-il, sans mouvement local? Certains commentateurs<sup>107</sup> ont exprimé l'opinion que pour Aristote il existait un milieu particulier, analogue au diaphane pour la lumière, qui serait le milieu de propagation du son, enfermé dans les pores de la matière, permettant une transformation de qualité à distance, sans transport de matière.

Dans le *De anima*, Aristote insiste à plusieurs reprises sur l'unicité de la masse d'air, qui ne s'émiette pas (ou ne se disperse pas), comme dans le cas d'un mouvement local d'un objet qui 'fend' l'air. Si on associe cette idée à celle exprimée par les mots 'répercussion', 'rebondissement', 'résistance de l'air', on se représente le phénomène comme des mouvements alternatifs affectant une masse d'air, entre le corps sonore et l'oreille. Mais alors il y a transport de matière (l'air), même sur un petit espace, et donc comment peut-on qualifier le passage pendant lequel ce déplacement s'effectue, si ce n'est de 'mouvement local', qui suppose que la transformation est inachevée, et donc que le son n'est pas encore en acte. Car pour Aristote, le son n'a pas d'existence comme être, il est à la fois, et simultanément, le mouvement du corps sonore et sa perception par l'oreille<sup>108</sup>.

Aristote pose très rarement le problème du temps de propagation du son. Il en parle clairement dans les *Météorologiques*, lorsqu'il traite de l'orage<sup>109</sup> :

[...] il [l'éclair] survient après la collision [entre les nuages] et le tonnerre, quoique nous le voyons avant, parce que la vue est plus rapide que l'ouïe.

Aristote est en quelque sorte contraint de nier la durée de propagation du son, et donc d'attribuer le délai à d'autres causes. Il invoque donc la sensibilité moindre de l'oreille. Cette idée selon laquelle l'ouïe est moins sensible que la vue et qui explique le délai entre la vision et l'audition est reprise à maintes reprises, on le verra, par tous les auteurs qui traitent du sujet, jusqu'à la Renaissance.

Pourtant, dans le *De sensu*, Aristote semble aborder le problème posé dans le *De anima*, et admet le temps de propagation du son, donc son mouvement local, accompagné d'un déplacement de 'quelque chose' qui n'est pas une masse d'air<sup>110</sup>. Mais il ne s'agit que d'une allusion. Il est clair que ce type de mouvement, celui d'une perturbation du milieu, n'est pas envisagé parmi les catégories d'Aristote.

Alors on peut penser que pour Aristote, le son en acte, qui donc a achevé son mouvement devient immédiatement en puissance d'un autre son en acte qui lui succède, constituant ainsi une chaîne de parties d'air qui se meuvent tour à tour. C'est ce qui sera développé plus tard par les péripatéticiens, en particulier par Straton<sup>111</sup> et par un des auteurs des *Problèmes*<sup>112</sup>, mais qu'Aristote refuse parce que cette théorie suppose une discontinuité de l'air, théorie proche de l'atomisme et contraire à son système.

La problématique du son, tout juste abordée par Aristote, et que ses successeurs seront bien incapables de formuler et même d'imaginer, c'est de concevoir le son investi de deux types de mouvements qui obéissent à des lois différentes. L'un est un mouvement local, qui est correctement représenté comme un mouvement de petite ampleur et alternatif, qui affecte l'air contigu, l'autre est un mouvement de propagation du phénomène sans transport de matière, et ce mouvement, les philosophes ne parviennent pas à le représenter. C'est la question de la vitesse, longtemps associée à la hauteur de son, qui va poser réellement le problème. En effet, et Aristote le voit bien, si on peut effectivement opérer cette association, il faudrait alors accepter que les sons ne parviennent

<sup>106</sup> Cependant Aristote suggère cette proposition dans le *De sensu et sensibili*, II, chap 6.

<sup>107</sup> Barthélémy Saint Hilaire, *Psychologie d'Aristote*, trad. du *De anima*, Paris, Ladrangé, 1846, p 217.

<sup>108</sup> Dans un article consacré à l'interprétation par Alexandre d'Aphrodise de ce chapitre du *De anima* d'Aristote, Alan Towey fait une explication lexicale du texte et en particulier de cette notion de mouvement du son. Alan Towey, *Aristotle and Alexander on Hearing and Instantaneous Change : A Dilemma in Aristotle's Account of Hearing*, in 'The Second Sense, Studies in Hearing and Musical Judgement from Antiquity to the Seventeenth Century', Warburg Institute, University of London, 1991, pp.7-18.

<sup>109</sup> Aristote, *Météorologiques*, II, 9.

<sup>110</sup> Aristote, *De sensu et sensibili*, II, 6.

<sup>111</sup> Straton (ps-Aristote), *De audibilibus*, 803b. Ce texte sera attribué à Aristote jusqu'à la fin du XIXème siècle.

<sup>112</sup> Ps-Aristote, *Problemata*, trad. Pierre Louis, Paris, le Belles Lettres, 1993, sect. XI, 6, p. 10.

pas simultanément à l'oreille, selon leur acuité. Or ce n'est pas le cas, et c'est pourquoi Aristote envisage que la propagation du son est instantanée, et que le délai est attribué à une différence de sensibilité entre la vue et l'ouïe.

A la fin du chapitre du *De anima* consacré au son, Aristote aborde cette question de l'acuité et de son rapport avec la vitesse, théorie alors couramment admise :

[...] Car l'aigu meut le sens en peu de temps et un grand nombre de fois, et le grave, en un long espace de temps et peu de fois. Il n'en faut cependant pas conclure que l'aigu est le rapide, et le grave le lent, mais le mouvement qui fait l'un se produit avec rapidité, et celui qui fait l'autre avec lenteur [...] l'un meut en peu de temps, et l'autre en beaucoup de temps, de sorte que c'est seulement par voie de conséquence que l'un est rapide, et l'autre lent.<sup>113</sup> [...]

Aristote distingue la sensation d'acuité du mouvement qui la provoque. Il frôle ici la notion moderne de vibration, puisqu'il évoque la notion du nombre d'événements ('un grand nombre de fois') dans une unité de temps pour caractériser la hauteur de son. Mais ce passage est confus (disons plutôt subtil), et a été considéré comme tel par tous les commentateurs.

La difficulté de définir des paramètres précis caractérisant le son est consécutive à l'impossibilité alors d'observer le phénomène sonore, et le recours à l'analogie est nécessaire à la description. En revanche il est admis que l'intensité est associée à une notion quantitative. Peu à peu un vocabulaire se construit, et comme le relève Aristote, sur une dialectique des contraires : grave et aigu, clair et confus, plus tard on dira strident et sourd, sec et ample, etc.

Curieusement, alors que la hauteur des sons est attribuée à la vitesse du mouvement, on ne cherche pas à caractériser cette grandeur par des qualificatifs dynamiques, mais plutôt de l'ordre de la forme, du tangible dit Aristote, voire de la géométrie. On relève ainsi à la fin du texte sur le son dans le *De Anima* <sup>114</sup>:

Et il semble y avoir une certaine analogie avec ce qu'est, pour le toucher, l'aigu et l'obtuse. Car l'aigu fait en quelque sorte une piqûre, et l'obtuse une poussée, par le fait que l'un meut en peu de temps, et l'autre lentement, de sorte que c'est seulement par voie de conséquence que l'un est rapide, et l'autre lent.

Aristote tente de concilier le vocabulaire du tangible avec celui du mouvement, par référence à la représentation qu'on se fait de la poussée. Il y reviendra dans les *Topiques*, pour conclure le chapitre consacré aux homonymies et à la difficulté de caractériser les sensations par des mots <sup>115</sup> :

De même aussi, le clair, appliqué à un solide, [c'est] une couleur; appliqué à un son vocal, [c'est] de bien s'entendre. Et c'est presque pareil pour l'aigu; là encore, la même chose ne se dit pas de la même manière en regard de tous [les sujets] : en effet, le son vocal aigu, c'est le [son vocal] rapide, comme l'affirme la théorie mathématique de l'acoustique; l'angle aigu, [c'est] l'[angle] inférieur à un droit; la lame aiguë, [c'est] la [lame] taillée à angles aigus.

Au-delà de la représentation de la hauteur des sons par des analogies avec le tangible, Aristote pointe à nouveau le problème de la vitesse qui lui est associée. Et l'analogie entre l'aigu qui pique et le grave qui pousse, introduit une nouvelle notion propre au mouvement du son. Quelque chose qui évoquerait la notion de quantité de mouvement, à la fois liée à la vitesse et à une certaine 'masse' sonore, plus importante pour les sons graves. Pourtant cette 'masse' n'est pas non plus la quantité d'air déplacé, qui elle, est associée à l'intensité. Alors peut être quelque chose qui ressemblerait à la pression, mais que devient alors la vitesse? Aristote n'est pas très clair à ce sujet, et il ne développe pas. Ses commentateurs et successeurs ne seront pas beaucoup plus prolixes, même ceux qui évoqueront l'analogie entre la propagation des sons et les ronds qui se forment à la surface de l'eau après qu'on y a jeté une pierre.

L'étude physique des sons est décidément une entreprise délicate et Aristote conclut, un rien agacé, son chapitre par ces mots : 'En ce qui concerne le son, restons-en là' <sup>116</sup>.

## Aristoxène

Pour Aristoxène, 'la voix est un mouvement suivant le lieu' <sup>117</sup>. On doit comprendre 'voix' (φωνή) comme l'équivalent de 'son', chez Aristoxène qui est avant tout un musicien et chez qui le

<sup>113</sup> Aristote, *De l'âme*, II, 8.

<sup>114</sup> Aristote, *De l'âme*, II, 8.

<sup>115</sup> Aristote, *Topiques*, I, 15, traduction Yvan Pelletier, on relèvera l'usage anachronique du terme 'acoustique'.

<sup>116</sup> Aristote, *De l'âme*, II, 8. Cette expression est sans doute en usage dans les textes aristotéliens, mais il est inévitable de faire cette remarque, tant Aristote semble décontenancé par cette étude.

'son' représente plutôt la note. Il ne parle pas en physicien, le son en général (φθόγγος) et le bruit (ψόφος) ne l'intéressent pas. L'évocation du mouvement selon le lieu réfute toute allégation d'un mouvement qualitatif de type allosôsis, il s'agit bien d'un 'mouvement local', phora, donc avec transport de matière. Il poursuit :

La voix n'a pas une manière unique de se manifester; lorsque nous parlons aussi bien que lorsque nous chantons, elle reçoit le mouvement précité (suivant le lieu). Evidemment le grave et l'aigu se rencontrent dans l'un et dans l'autre cas; or c'est un mouvement suivant le lieu que celui dans lequel se produisent le grave et l'aigu: seulement ce double mouvement n'est pas d'une seule et même espèce.

Il n'est jamais arrivé à personne de signaler la différence qui règne entre ces deux mouvements, et cependant, si cette distinction n'est pas faite, il n'est pas du tout facile d'expliquer la nature du son.

4. Il sera indispensable, si l'on ne veut pas faire comme Lasus et quelques autres musiciens, disciples d'Épigonos, qui pensaient que le son a une sorte de largeur, de parler à ce sujet avec un peu plus d'exactitude [qu'ils n'ont fait]; car une détermination précise [de la nature du son] rendra la suite beaucoup plus claire.

Malheureusement Aristoxène n'en dit pas beaucoup plus après la présentation du plan de son ouvrage, et la 'détermination précise' ne se rencontre pas dans son texte. L'allusion à la 'largeur du son', concept qu'il attribue à Lasos d'Hermione, est sans doute liée à la plage d'indétermination qui pouvait exister alors dans l'établissement des hauteurs de son. Il semble que Lasos parlât surtout des instruments à vent, dans lesquels les intervalles ne se manipulent pas aussi facilement que sur le monocorde. Aristoxène n'est pas un physicien, c'est un musicien, et si le mouvement est local, ses deux 'espèces' concernent le son parlé qui est continu parce que les hauteurs s'enchaînent sans palier, et le son chanté qu'il nomme discontinu parce que les sons s'établissent et sont 'en repos' sur des notes définies. Il lui importe peu de savoir si le mouvement prend du temps, si le déplacement est d'air ou d'autre chose, et si la vitesse du déplacement est liée à la hauteur. Pourtant sa démarche est presque celle d'un physicien qui tenterait de configurer le modèle pythagoricien, et platonicien, d'une façon qui respecterait la réalité des sons au détriment de la beauté des nombres. Mais son champ d'investigation se limite à l'étude des intervalles et ne concerne qu'un aspect de l'étude des sons, l'harmonie. Pour Aristoxène, le mouvement de sons, c'est le mouvement harmonique de la voix.

## Les péripatéticiens

On regroupe dans ce paragraphe les traités écrits sous le nom d'Aristote par ses disciples, comme le *De audibilibus* qu'on attribue de nos jours à Straton (début du III<sup>e</sup> siècle av. J.-C.) et les *Problèmes d'Aristote*, rédigés par différents auteurs péripatéticiens à partir du III<sup>e</sup> siècle av. J.-C., et parmi ceux-ci, les deux sections consacrées à l'acoustique, la section XI qui concerne la voix, et la section XIX consacrée aux intervalles et à l'harmonie. Les traducteurs et les commentateurs s'accordent pour une datation de ces deux sections postérieure au *De audibilibus*.

Nous avons vu comment la théorie d'Aristote avait été interprétée dans le *De audibilibus* de Straton. Incapable de représenter correctement les mouvements de l'air, Straton réintroduit dans le son, la notion de chocs chère aux présocratiques, qui n'interviennent pas seulement au niveau de la production des sons, mais également à celui de la propagation. En effet, dans le *De audibilibus*, les chocs s'appliquent successivement à des 'tranches' d'air conjointes. Le mouvement du son est considéré comme une succession d'événements séparés par des intervalles trop brefs pour être perçus, et la hauteur est liée au nombre de ces événements. On sait que Straton remet en question la notion de continu présente dans la *Physique* d'Aristote, et on en a ici un exemple. La discontinuité apparaît à la fois dans la structure de l'air composé de parties, et dans la nature du mouvement envisagé comme une succession d'événements.

## Les *Problemata* du Pseudo Aristote

Les *Problèmes d'Aristote* se composent de séries de questions sur des sujets divers, suivies de réponses d'abord sous forme interrogative, puis suivies d'affirmatives, qu'Aristote aurait pu donner. Il arrive qu'à des questions identiques des réponses différentes apparaissent, et on peut se demander si ces *problèmes* ne constituent pas une sorte d'exercices corrigés donnés à certains disciples fréquentant le Lycée. Les problèmes sont rédigés par plusieurs auteurs, et probablement à des époques différentes. Quoi qu'il en soit, dans la section XI, consacrée à la voix, on trouve quelques enseignements sur la connaissance acoustique de cette époque. Comme dans le *De audibilibus*, le sujet essentiel de cette section est la voix considérée sous ses aspects physiologiques et environnementaux, en particulier les déformations qu'elle subit en diverses circonstances. Les quelques questions acoustiques traitent des déformations liées à la distance ou à la configuration spatiale. Une

<sup>117</sup> Aristoxène, *Eléments harmoniques*, trad. Ch-E. Ruelle, Paris, Pottier de Lalaine, 1871, I, 2.

certaine insignifiance se dégage parfois, tant des questions que des réponses, et on ne peut qu'être surpris de l'importance accordée à certains problèmes, alors que la question de la propagation des sons n'est pas encore résolue. Par exemple on pose la question<sup>118</sup> :

Pour quoi la voix, du moment qu'elle est une sorte de flux qui se porte naturellement vers le haut est-elle mieux perçue de haut en bas que de bas en haut ?

La question seule, qui porte en elle une affirmation nullement vérifiée, nous déconcerte un peu. La réponse (de forme interrogative, comme souvent dans les *Problèmes*) est finalement assez cohérente :

Est-ce parce que la voix est une certaine quantité d'air avec de l'humidité ? Donc cet air alourdi par l'humidité est porté vers le bas et non vers le haut. Car le mouvement naturel de l'humide est d'aller vers le bas. C'est pourquoi on entend mieux quand on est en bas.

Mais cette réponse suppose que le son de la voix est porté par une masse d'air en déplacement, et même s'il est vrai que dans le cas de la voix un souffle accompagne la propagation des sons, c'est en contradiction avec les théories développées par Aristote, aussi bien dans le *De anima*, que par Straton dans le *De audibilibus*. Mais l'auteur remarque bien l'objection et il poursuit :

Ou est-ce que ce phénomène n'est produit que par la voix des êtres vivants (qui, elle, est imprégnée d'humidité) ou se remarque-t-il également pour les autres sons ?

Apparemment l'expérience ne sera pas effectuée. Puis l'auteur fait une analogie avec la propagation de la lumière qui serait un rayon partant de l'œil vers l'objet, avant de revenir à l'œil, ce qui est en complète contradiction avec la théorie aristotélicienne de la vision, et fait plutôt référence aux présocratiques comme Empédocle :

Donc, de même que la vision, si elle se dirige de haut en bas, fait sa réflexion vers le haut et, si elle tombe de bas en haut, se réfléchit vers le bas, de la même façon la voix qui a une propension naturelle vers le haut, quand elle se heurte à l'air qui lui fait obstacle, ne peut pas le forcer parce qu'il est plus abondant et plus lourd qu'elle, mais cet air répercuté et entraîné en sens inverse est porté vers le bas, et le son est mieux perçu en bas. Un phénomène du même ordre se produit également dans le cas de l'écho, répercussion de la voix en sens contraire.

Dans ce cas, selon l'auteur, la voix rencontrerait une masse d'air vers le haut, plus lourde qu'elle, qui ferait obstacle à sa progression, de même que dans l'écho. Décidément la rigueur aristotélicienne se délite.. Comme le dit Pierre Louis dans son introduction, 'la culture scientifique de l'auteur de cette section est assez rudimentaire'. Cependant on remarquera l'intuition sans doute involontaire du mouvement sonore rencontrant une masse d'air inerte qui fait obstacle et se répercutant par un mouvement contraire. C'est en effet ce qui se passe dans les instruments à vent, et ce qui provoque l'apparition d'ondes stationnaires. C'est également, d'une autre façon, ce qui se passe dans l'écho, mais tout ceci est bien entendu indépendant des directions verticales des mouvements d'air.

Les questions relatives à la distance sont parfois intéressantes<sup>119</sup> :

Pourquoi la voix paraît-elle plus aiguë quand on se trouve à une plus grande distance, alors que l'aigu dépend de la rapidité du mouvement et que le mobile qui arrive de loin se meut plus lentement ?

On revient ici à cette grande confusion entre la rapidité du mouvement alternatif de l'air, associée à l'acuité, qu'on ne parvient pas à dissocier du mouvement de propagation du son.

Est-ce parce que l'acuité du son ne dépend pas seulement de la rapidité du mouvement mais aussi de la finesse extrême du son ? Or quand les gens se trouvent plus loin, la voix les atteint toujours avec une finesse plus grande en raison de la petite quantité d'air mise en mouvement. Car le mouvement s'épuise et l'effet de l'épuisement est, pour un nombre de tendre vers l'unité, pour un corps de n'avoir plus qu'une seule dimension, ce qui, dans ce cas, est la finesse. Il en est de même pour la voix.

L'auteur introduit une idée nouvelle, le son serait un déplacement selon une ligne (la finesse), qui serait le résultat d'une transformation du déplacement d'air initial en 'déplacement à une dimension' qui entraîne une moins grande quantité d'air en mouvement, au détriment d'une plus grande acuité. Cette approche originale n'est évoquée ni par Aristote ni par Straton.

Mais n'accablons pas cet auteur qui de temps à autres exprime des idées audacieuses pour l'époque, et tout à fait pertinentes<sup>120</sup> :

<sup>118</sup> Pseudo-Aristote, *Problèmes*, trad. Pierre Louis, Paris, Les belles lettres, 1993, t. 2, XI, 45, p. 24.

<sup>119</sup> *id.*, 20, p 15.

Pourquoi la lumière, qui est plus fine, et qui se propage plus loin et plus vite, ne traverse-t-elle pas les corps denses alors que le son les traverse ? Est-ce parce que la lumière se dirige en ligne droite, si bien que si quelque obstacle s'oppose à sa trajectoire rectiligne, elle est entièrement interceptée, tandis que le son continue son trajet, même s'il n'est pas droit, parce qu'il est un souffle ? Voilà pourquoi nous entendons un bruit de quelque côté qu'il vienne, et nous n'entendons pas seulement les bruits qui atteignent tout droit nos oreilles.

La question des propagations comparées de la lumière et du son en est encore à ses débuts, mais cette approche est intéressante à plusieurs titres, propagation rapide et en ligne droite de la lumière, rôle de l'air dans la propagation du son, et même esquisse d'une notion de propagation sphérique du son. Là encore l'auteur prend des initiatives et elles sont plus heureuses. Remarquons l'allusion à la lumière se propageant vite, donc dans un certain temps, ce qui est en accord avec Empédocle, mais contredit Aristote pour qui la lumière est instantanée<sup>121</sup>.

Plusieurs questions sont relatives à la différence de propagation des sons graves ou aigus<sup>122</sup> :

Pourquoi donc les sons plus aigus portent-ils plus loin ? Est-ce parce que l'acuité dans une voix vient de la vitesse, que ce qui est lancé avec une plus grande violence se meut plus rapidement, et que ce qui est poussé avec plus de force porte plus loin ?

Outre le paradigme balistique encore une fois invoqué, le raisonnement est ici assez curieux, la vitesse des sons aigus semble impliquer un choc initial est plus violent. Ce thème est abordé également dans plusieurs autres questions, avec des nuances, comme ici, où c'est maintenant la distance qui semble provoquer l'acuité<sup>123</sup> :

Pour quoi de loin les voix paraissent-elles plus aiguës ? Ce qu'il y a de sûr c'est que lorsqu'on veut imiter des gens éloignés et qui crient, on prend une voix aiguë, pareille à ce que renvoie l'écho, et que le son de l'écho est plus aigu. C'est qu'il est éloigné parce qu'il est réfléchi.

Cependant puisque dans le son le rapide est aigu et le lent grave, les voix éloignées devraient paraître plus graves. Car tout ce qui est en mouvement va de plus en plus lentement à mesure qu'il s'éloigne de son point de départ, pour finir par tomber.

[...]La cause en est que c'est l'air mis en mouvement qui produit le son. Et de même que le premier moteur qui met l'air en mouvement produit un son, de même faut-il que l'air continue à en faire autant, tantôt moteur, et tantôt mû<sup>124</sup>. C'est pourquoi le son est ininterrompu, puisque sans cesse un moteur succède à un moteur, jusqu'à ce que le mouvement s'épuise, ce qui pour les objets signifie tomber, lorsque l'air ne peut les faire avancer, ici la flèche, là l'air lui-même. Car pour ce qui concerne la voix continue, elle se produit lorsque de l'air est poussé par de l'air, et pour ce qui est de la flèche, elle est portée en avant tant que le corps en question est mû par l'air. Ainsi dans le dernier cas, c'est toujours le même objet qui est porté jusqu'au moment où il tombe, et dans le premier il s'agit toujours d'un air différent.

Le début de la réponse paraît un peu hors sujet, on ne sait pas bien ce que l'écho vient faire ici. Cependant, même si la réponse n'est pas approfondie, le son de l'écho devrait paraître plus grave puisque le mouvement ralentit. Et c'est ce que l'auteur objecte dans la phrase suivante. Dans le développement qui suit, on assiste à un réel progrès du raisonnement de l'auteur avec une analyse très pertinente de la comparaison entre le mouvement d'un objet, la flèche, et celui du son, qui est un mouvement de l'air. Ici on a une nette explication du phénomène, 'un moteur succède à un moteur', et ce n'est plus le choc initial qui met l'air en mouvement dans la totalité du processus de propagation. 'L'air est poussé par de l'air', et c'est la différence essentielle que l'auteur a identifiée avec raison. Dans le cas de l'objet, c'est toujours le même, alors que dans le cas du son, c'est toujours un air différent. Il aurait pu également prendre l'exemple du vent, différent dans son mouvement de celui du son.

Et l'auteur poursuit un peu plus loin en expliquant la propagation du son dans toutes les directions<sup>125</sup> :

[...] C'est pourquoi l'objet lancé tombe en un seul point, tandis que le son se disperse en tous sens, comme si ce qu'on a lancé, tout en poursuivant sa trajectoire, se brisait en mille morceaux et même revenait en arrière.

Cette nouvelle approche est résolument en progrès par rapport aux autres questions, et on a affaire ici à une modélisation physique du phénomène, le choc initial ébranle une partie d'air, qui elle-même met en

<sup>120</sup> *id.*, 49, p. 25.

<sup>121</sup> Voir le *De anima*, II, 6.

<sup>122</sup> *id.*, 47, p. 25.

<sup>123</sup> *id.*, 6, p. 9-10.

<sup>124</sup> Pierre Louis indique que la traduction n'est pas sûre, Th. Gaza avait traduit : *ut partim moveat partim moveatur*.

<sup>125</sup> *Ibidem*.

mouvement une partie conjointe. On s'inspire ici de la thèse développée dans le *De audibilibus*, mais de façon beaucoup plus claire grâce à la comparaison avec le mouvement d'objets lancés. On invente ici un autre type de mouvement qui possède ses propres lois de propagation, différentes de celles de la mécanique strictement balistique.

### La division du canon attribuée à Euclide

Cette notion apparaît dans l'introduction de la *Division du canon*, attribuée à Euclide<sup>126</sup> :

Si rien n'est en mouvement, et que tout est au repos, alors il se fait un silence absolu. S'il se fait le silence, et que rien n'est en mouvement, alors rien n'est audible. Pour que quelque chose soit entendu, il est nécessaire qu'il se fasse d'abord un ébranlement et un mouvement. Comme tous les sons se font à partir d'un ébranlement et comme il n'est pas possible qu'un ébranlement se fasse sans mouvement préalable ; comme parmi les mouvements les uns sont plus denses, les autres plus rares ; et comme les mouvements plus denses font le son plus aigu, et les plus rares, le plus grave ; Il est donc nécessaire que, dans les sons, ceux qui sont plus aigus le sont en raison de la densité et du nombre des mouvements, et ceux qui sont plus graves le sont par la rareté et le peu de mouvements.

Pour l'auteur de la *Division du canon*, le choc (πληγή), traduit en latin par *pulsus*, est un ébranlement. Il est indissociable du mouvement qui en est la cause. Il ne peut y avoir de son sans ébranlement, donc sans mouvement. La lecture de cet extrait après celle du *De audibilibus* montre des similitudes frappantes, en ce qui concerne les mouvements denses ou rares et leur influence sur la hauteur des sons. En particulier l'auteur semble tenir pour certain que les mouvements denses font les sons aigus, ce qui n'est pas argumenté dans ce texte, et ce qui donc suppose une connaissance préalable de cette loi. Il semble donc que ce texte ait été écrit par un auteur qui avait lu le *De audibilibus*. Lorsqu'au début du XX<sup>ème</sup> siècle, Paul Tannery a mis en doute l'authenticité de la paternité Euclidienne de ce traité<sup>127</sup>, il s'est trouvé un certain nombre de commentateurs pour l'attribuer à Archytas, il semble bien que ces quelques lignes montrent le contraire<sup>128</sup>. En effet la description des chocs sur l'air comme une succession d'événements sonores, dont la densité provoque l'acuité est plus proche du *De audibilibus*, que des approximations d'Archytas. Par ailleurs, si on suppose, comme Paul Tannery, que la *Division du Canon* ait été écrit avant Aristote, par exemple par Eudoxe, on se demande pourquoi le Stagiritique, qui l'aurait alors forcément lu, était aussi confus dans le *De anima* lors de la description du phénomène sonore qui est clairement expliqué ici.

Quoi qu'il en soit, Euclide affirme ici la nécessité du mouvement pour qu'il y ait production de son, et cette idée sera reprise par de nombreux auteurs. Le choc initial d'Aristote n'est plus seulement suffisant, et le mouvement n'est plus seulement le mouvement local qui accompagne l'objet frappant. Il existe une autre sorte de mouvement, caractéristique du son. L'autre idée maîtresse de ce passage, c'est la notion de densité ou de rareté des mouvements, et non plus seulement des chocs qui les produisent, associées à l'acuité ou à la gravité des sons. Avec Euclide le mouvement propre au son est un mouvement particulier, lié à des chocs successifs, et doté d'une propriété différente de sa vitesse, qu'on appelle densité ou rareté. On n'en est pas encore à dénombrer ces mouvements dans une unité de temps, ce n'est pas la préoccupation du moment, mais l'intuition de ce type de phénomène commence à prendre forme. Peu à peu le vocabulaire se construit et on parlera bientôt, chez Boèce par exemple, de mouvements plus ou moins fréquents.

### Le mouvement du son après Aristote

La question du mouvement associé à la propagation du son trouve des développements dans deux directions à l'époque hellénistique, l'une invoquant un mouvement de matière sous forme de corpuscules de son, ce sera la théorie atomiste d'Epicure et de Lucrèce, et l'autre qui prendra corps lentement dans la sphère stoïcienne, celle d'un mouvement préfigurant le mouvement ondulatoire grâce à une analogie, les ronds dans l'eau après qu'on y a jeté une pierre. Ces deux approches sont développées plus loin.

Les autres courants de pensée, qu'ils soient néoplatoniciens ou néo-pythagoriciens, au début de notre ère, reprennent les théories aristotéliennes, en y incluant peu à peu la théorie ondulatoire, toujours sous forme d'une comparaison avec les ronds dans l'eau.

<sup>126</sup> Euclide (attribué à), *La division du canon*, chapitre 1, traduction à partir d'un texte latin, *Euclidis Rudimenta musices*, Paris, 1557, p 43, confrontée à la traduction de C.E. Ruelle, in *Revue des Etudes grecques*, t XVII, 1883, p 302, et au texte grec édité par Karl von Jan, Leipzig, Teuner, 1895, p. 148.

<sup>127</sup> Paul Tannery, Inauthenticité de la *Division de Canon*, 1904, in *Mémoires scientifiques*, Paris, Gabay, 1915, t III, p 212-219. Thèse réfutée par C.E Ruelle l'année suivante.

<sup>128</sup> Huffman partage ce point de vue. Voir Carl A. Huffman: *Archytas of Tarentum. Pythagorean, Philosopher and Mathematician King*, Cambridge University Press 2005, p 130.

C'est ainsi que Boèce, vers le VI<sup>ème</sup> siècle, dans le *De institutione musica*, reprend d'abord la théorie d'Euclide sur le mouvement accompagnant le son<sup>129</sup> :

On ne peut produire de son sans une vibration [*pulsus*] et un choc [*percussio*], et il ne saurait en aucune manière y avoir vibration ni choc sans qu'un mouvement ait précédé. Si toutes choses en effet demeureraient immobiles, il ne pourrait y avoir rencontre entre deux objets qui fasse que l'un soit mis en branle par l'autre. Tout serait alors stable et privé de mouvement de sorte qu'il n'y aurait aucun son. Voilà pourquoi le son est défini comme un choc de l'air qui se transmet sans perte jusqu'à l'ouïe.

L'utilisation du terme 'vibration' pour *pulsus* est anachronique, il s'agit bien entendu d'un 'ébranlement', le 'choc' étant la traduction de *percussio*. Boèce, en reprenant Euclide, insiste sur l'antériorité du mouvement sur l'ébranlement. Il est encore difficile de concevoir le son comme un mouvement propre. Puis il décrit avec précision le mouvement alternatif de la corde tendue et des sons qu'elle produit<sup>130</sup> :

Or parmi les mouvements, les uns sont plus rapides, les autres plus lents, et parmi ces mêmes mouvements les uns sont plus espacés, les autres plus rapprochés. Car si l'on considère un mouvement dans sa continuité, il est nécessaire de tenir compte de sa rapidité ou de sa lenteur. Si l'on bouge la main, on l'agitera d'un mouvement soit fréquent, soit espacé. Là où le mouvement aura été lent et plus espacé, on produira nécessairement des sons graves, en raison de cette lenteur et de l'espacement. Mais si les mouvements sont plus rapides et plus rapprochés, on obtiendra des sons plus aigus. Aussi, si l'on augmente la tension d'une corde, elle rend un son plus aigu, si l'on relâche cette tension, elle rend un son plus grave. Plus elle est tendue, plus sa vibration est rapide et plus vif son retour : elle frappe l'air plus fréquemment et avec des battements plus rapprochés. Une corde plus détendue produit des vibrations relâchées, lentes et espacées en raison de la faiblesse de sa frappe et elle ne vibre pas très longtemps.

Les deux dernières phrases sont, dans le texte :

Quando enim tensor est, velociorem pulsum reddit celeriusque revertitur, et frequentius ac spissius aerem ferit. Qui vero laxior est, solutos ac tardos pulsus effert, rarosque ipsa inbecillitate feriendi, nec diutius tremitt.

Encore une fois, *pulsus* est traduit inexactement par vibration. On voit coexister deux termes pour caractériser le mouvement, *velox* pour les ébranlements, qu'on pourrait traduire par 'preste', et *celer*, rapide pour le mouvement de retour de la corde. La traduction de *tremare* par 'vibrer' est acceptable, mais il serait moins ambigu de dire 'trembler'. Derrière ces tâtonnements de vocabulaire, on perçoit l'intuition d'une distinction entre ces deux mouvements, l'un pris isolément, celui de la corde dans son mouvement de retour, et l'autre plus global, qui est ce qu'on ne nomme pas encore 'vibration', mais 'ébranlement' (*pulsus*), parce qu'on ne l'a pas encore identifié. Pour que ce nouveau type de mouvement existe comme concept physique, il faudra attendre qu'on en identifie le paramètre constituant, c'est-à-dire le nombre de coups dans le même temps, ce qu'on nomme aujourd'hui 'fréquence'. On n'en est pas encore là chez Boèce, il faut le souligner.

Plus tard, Thomas d'Aquin (1225-1274) écrit un commentaire du *De anima* d'Aristote qu'il complète grâce aux connaissances produites depuis l'Antiquité. Il cite notamment Boèce pour expliquer le passage assez délicat du chapitre 8 du *De Anima* sur les différences de mouvements associés aux sons aigus et graves. Mais encore une fois le traducteur s'emballe et utilise un vocabulaire qui fait référence à celui des mouvements vibratoires, qui est inapproprié, quoique familier aujourd'hui : 'Aussi une corde plus tendue sonne aigu, parce qu'une percussion unique lui communique une fréquence plus grande'<sup>131</sup> [*quia ex una percussione frequentius movetur*], ce qui devrait plutôt être traduit par 'parce qu'elle est mue plus fréquemment par une seule percussion'. Ce qui pourrait paraître comme un point de détail est important, car, encore une fois, en plus du contresens, le vocabulaire associé au mouvement vibratoire (le terme 'fréquence') ne peut pas être utilisé ici puisque ce type de mouvement n'existe pas encore. En revanche 'fréquemment' est acceptable, puisqu'il signifie 'plus souvent'. Utiliser ce vocabulaire pourrait laisser supposer que les concepts associés aux mots sont connus, et on a vu comment on avait, de cette façon, au XIX<sup>ème</sup> siècle, attribué à Aristote la découverte de la nature vibratoire des sons, à la suite d'une traduction anachronique du *De audibilibus* (dont, de plus, il n'est pas l'auteur...). Cet exemple illustre l'importance du langage dans la structuration des concepts.

## Le *De generatione sonorum* de Robert Grosseteste

Robert Grosseteste (1175-1253) est l'un des premiers savants représentant le courant de la Science renaissance du XIII<sup>ème</sup> siècle. Evêque de Lincoln, franciscain, il écrit, en plus de nombreux ouvrages

<sup>129</sup> Boèce, *De institutione musica*, trad. Ch. Meyer, Turnhout, Brepols, 2004, p 35.

<sup>130</sup> *Id.* p.37.

<sup>131</sup> Thomas d'Aquin, *Commentaire au Traité de l'Ame*, livre II, leçon 17, 464 trad. Y. Pelletier, Univ. Laval, Québec, 2000.

théologiques, plusieurs traités scientifiques, et notamment sur la lumière (*De luce*). Très influencé par la démarche empirique d'Ibn al Haytham, récemment introduit en Europe par l'intermédiaire de traducteurs andalous, Grosseteste développe une théorie nouvelle du rayon de lumière, en accordant à celle-ci une nature corporelle, indépendante de la vision. A la suite d'Ibn al Haytham, il étudie la réflexion, la réfraction et leurs applications, miroirs et lentilles. Le *De generatione sonorum* est un court texte sur la nature physique de la voix. Les deux premiers paragraphes décrivent d'une façon très originale le phénomène de production des sons<sup>132</sup> :

Lorsqu'un corps sonore est violemment percuté, des parties de ce [même] corps sortent de leur lieu naturel, que la nature du corps sonore fait revenir vers leur lieu naturel ; et par la force de ce type de tendance, les parties sorties de leur lieu naturel, revenant en totalité vers ce lieu naturel, avancent même au-delà vers un lieu qui ne leur est pas naturel; et la tendance naturelle le fait à nouveau revenir par le chemin inverse vers le lieu naturel, et il se produit ainsi un léger tremblement dans les parties situées aux extrémités du corps sonore. Et ce tremblement est perceptible à la vue et au toucher.

On assiste vraiment ici à une description précise, étape par étape, du phénomène sonore. Il s'agit bien entendu d'une spéculation, mais elle est d'une grande pertinence, sur le plan de la physique. L'élasticité est mise en évidence par trois phases, l'émission de parties de matière lors de la percussion, le retour vers le lieu naturel, respectant ainsi la physique aristotélicienne, et enfin la ré-émission, la projection vers le lieu non naturel, consécutive au rebond. Ce mouvement alternatif, décrit ici pour la première fois, produit un tremblement perceptible, ce qui avait déjà été mis en évidence par les Anciens.

Le second paragraphe se fait plus précis :

Ce tremblement des petites parties est nécessairement suivi, lors de la sortie du lieu naturel, d'une extension des mêmes parties selon le diamètre longitudinal et d'une contraction selon le diamètre transversal; et au contraire, lors du mouvement de retour vers le lieu naturel, on assiste à une diminution du diamètre longitudinal, et à une augmentation du diamètre transversal. Et ce mouvement du corps sonore, selon des extensions et des contractions dans les petites parties, qui accompagne le mouvement local de tremblement, constitue le son ou la célérité naturelle propre au son. Et lorsqu'elles tremblent, les parties du corps sonore mettent en mouvement l'air [qui leur est] contigu selon un mouvement semblable au leur, et cet air parvient jusqu'à l'air de même nature résidant dans les oreilles, et il se produit une impression du corps qui n'est pas ignorée de l'âme, et il en résulte le sens de l'audition.

Le mouvement alternatif des parties de matière s'accompagne de déformations homologues du corps sonore, dans les deux dimensions, qui se communiquent à l'air contigu. C'est assez subtil, car en effet les petits mouvements des parties de matière seraient incapables de mouvoir l'air, alors que les déformations de la matière elle-même, plus importantes en volume, peuvent communiquer leur mouvement. Le processus de propagation est plus conventionnel, Grosseteste ne s'y attarde pas, l'air propage les mouvements jusqu'à l'air interne de l'oreille qui communique avec l'âme.

On dispose enfin d'une explication de la transformation d'un choc, ébranlement initial, en tremblement, c'est-à-dire en succession de petits mouvements alternatifs de matière autour d'une position de repos. Cette particularité fondamentale du mouvement sonore, même si elle avait été évoquée, n'avait jamais été décrite dans son processus. On peut maintenant envisager un type de mouvement particulier, qui est doté de ses lois et de ses grandeurs, la vibration. Il faudra cependant encore attendre quelques siècles avant qu'elle soit réellement formalisée.

## **Conclusion : les mouvements associés au son**

Vers la fin du Moyen Âge, les rares savants qui s'intéressent à la nature physique des sons ont les moyens de distinguer trois types de mouvements associés à la propagation sonore. L'un, purement local, est celui du corps sonore, autour de sa position de repos lorsqu'il est ébranlé. Le second est ce nouveau type de mouvement, pris dans son ensemble, la vibration. Le troisième est le mouvement de propagation du phénomène sans transport de matière. Nous n'avons aucune trace d'une telle entreprise de décomposition du mouvement sonore. Le son n'est envisagé que dans son utilité, comme matériau de base de l'harmonie. Son intangibilité et sa fugacité rendent sa description et son étude presque impossible avec les outils d'observation et d'analyse de l'époque. On verra comment les premiers scientifiques expérimentateurs vont s'y prendre pour réaliser cette recherche.

<sup>132</sup> Robert Grosseteste, *De generatione sonorum*, in *Die Philosophischen Werke des Robert Grosseteste, Bischofs von Lincoln*, Münster, Aschendorff, 1912, p. 7.



## 5 - Les sons sont des corpuscules ou des ondes

### Les atomistes

#### Démocrite et les débuts de l'atomisme

Vers le Vème siècle avant notre ère, les théories physiques de la matière se fondent sur les quatre éléments, la notion de continuité et la divisibilité infinie de la matière. On retrouve ces principes chez Anaxagore et ce sera le fondement de la physique d'Aristote. Aux côtés de cette approche, on voit apparaître un courant bien différent qui énonce une description de la structure de la matière fondée sur deux entités, l'atome et le vide. C'est d'abord Leucippe, puis son disciple Démocrite qui en seront les inspirateurs. La nature est constituée d'assemblages de corpuscules très petits, mais Démocrite admet qu'il peut en exister de gros, insécables et d'une grande dureté, qui semblent baigner dans un océan de vide. Ces atomes, puisque c'est ainsi qu'on les nomme, sont constamment en mouvement. Leur mouvement est naturel et échappe à toute autre loi connue que celle de la chute. Il s'entrechoquent et alors leur mouvement devient erratique et se transforme en tourbillons. Les assemblages d'atomes sont de combinaisons infinies, et construisent des formes qui constituent les éléments de matière. Les interstices entre les atomes sont 'occupés' par du vide, que les corpuscules soient conjoints ou disjoints. La physique atomiste est une physique du discontinu. Cette théorie, sans doute la plus originale de l'Antiquité, sera vigoureusement combattue par un grand nombre de philosophes, et notamment par Platon, qui voulait brûler les livres de Démocrite<sup>133</sup>. Aristote soutient la continuité de la matière sous les quatre éléments, et sa divisibilité infinie. Par ailleurs Aristote nie l'existence du vide, notion nécessaire à la théorie atomiste, puisque seules certaines formes de solides peuvent s'assembler sans interstices (comme les cubes ou les tétraèdres, ce qu'Aristote démontre dans la *Physique*). Enfin Aristote attaque Démocrite sur la pesanteur de l'atome<sup>134</sup>, et ce sera un argument décisif qu'Epicure, successeur de Démocrite, devra prendre en compte pour consolider la théorie de l'atomisme.

La théorie de la vision chez Démocrite fait appel à la notion de simulacres, sortes d'images composées d'atomes qui émanent des objets vers l'oeil. Il est probable que Démocrite pensait que la vision était la résultante de cette émanation et d'un rayon visuel provenant de l'oeil. L'image se recomposait alors entre l'oeil et l'objet. Inspirée d'Empédocle et d'Alcméon, cette théorie était fréquemment adoptée chez les présocratiques.

Il est difficile de concevoir l'ensemble du système de Démocrite, les seuls textes qui nous sont parvenus sont des commentaires, en général polémiques, d'auteurs postérieurs comme Aristote ou son disciple Théophraste. Diogène Laërce donne la liste des ouvrages qu'aurait écrits Démocrite, parmi lesquels un traité des *Causes des sons*, malheureusement disparu. En dehors du paragraphe extrait du traité *De sensu* de Théophraste concernant l'audition<sup>135</sup>, qui ne nous renseigne pas beaucoup sur la théorie de la propagation, nous ne savons rien de l'acoustique de Démocrite. Par contre la théorie de la vision et des couleurs est développée sur plusieurs pages, et on peut reconstituer, par analogie, la théorie de l'audition, en extrapolant la théorie des simulacres. Les atomistes qui écriront plus tard, comme Epicure et Lucrèce, seront un peu plus précis sur le sujet.

#### Epicure

On a souvent considéré Epicure comme un fidèle successeur de Démocrite, quoique ayant vécu près de deux siècles après l'Abdérain. Cicéron affirme cette filiation, et peu de textes des deux philosophes nous sont parvenus pour confirmer ou contredire cette appréciation. Cependant on admet que le système de Démocrite est plutôt une construction intellectuelle, et c'est sans doute ce qui fait dire qu'il est proche de Platon, alors que la physique d'Epicure se fonde sur la sensation et l'induction. Par ailleurs, là où Démocrite revendique un déterminisme qui laisse peu d'espoir à la liberté des hommes, Epicure introduit un concept original, le clinamen, sorte de déclinaison du mouvement vertical des atomes vers le bas, qui permet d'infléchir la fatalité de leur devenir. On a beaucoup glosé sur ce clinamen, sorte d'artifice intellectuel permettant d'échapper à la destinée, qui, sous la plume lyrique de Lucrèce perd beaucoup de son caractère scientifique. Les nombreux opposants à l'épicurisme moqueront ce concept abscons, comme Cicéron dans son *De natura deorum*. Cependant, dans un livre magnifique, *La Naissance de la Physique*, Michel Serres réhabilite l'atomisme de Lucrèce en invoquant les flux, les turbulences et la nature fluide des atomes et, complétant l'insécabilité de Démocrite, le clinamen devient alors un 'écart angulaire infiniment petit', une différentielle, qui engendre spirales et tourbillons<sup>136</sup> :

<sup>133</sup> Anecdote rapportée par Diogène Laërce.

<sup>134</sup> Aristote, *De generatione et corruptione*, I, 8.

<sup>135</sup> Ce passage a été étudié dans la partie concernant la sensation auditive.

<sup>136</sup> Michel Serres, *La Naissance de la Physique*, Paris, Ed. Minuit, 1977, p 11.

Démocrite, dès l'origine, paraît avoir produit en même temps une méthode mathématique d'exhaustion et l'hypothèse physicienne des insécables. Nous sommes en présence des premières formulations de ce qu'on nommera une différentielle. Le clinamen est donc une différentielle, et, proprement, une fluxion.

Quelques siècles avant les indivisibles de Roberval et les fluxions de Newton, les atomistes avaient en quelque sorte conçu un outil mathématique capable d'appréhender les lois de variations du monde naturel en mouvement, qui fait défaut aux observateurs d'un monde statique qu'étaient les aristotéliens. Les atomistes n'ont pas donné suite à cette piste.

Epicure a laissé trois textes qui nous sont parvenus par Diogène Laërce, dans lesquels il expose un abrégé de quelques-unes de ses théories, et notamment sa physique dans l'un d'eux, la *Lettre à Hérodothe*.

Les corps sont donc composés d'atomes insécables, durs, de formes différentes et infinies, et de dimensions diverses et non bornées. D'autre part ces atomes sont animés d'un mouvement perpétuel continu dans le vide qui est leur milieu naturel<sup>137</sup> :

Les atomes sont encore animés d'un mouvement perpétuel. (Épicure dit d'autre part qu'ils se meuvent avec une égale vitesse, car le vide leur communique éternellement, aux plus légers comme aux plus lourds, un mouvement identique.)

Les uns sont séparés par de grands intervalles, les autres, au contraire, conservant leur élan toutes les fois qu'ils sont déviés, s'unissent à d'autres ou deviennent les parties d'un composé. C'est la conséquence de la nature du vide, incapable par lui-même de les immobiliser. D'autre part, la solidité qui leur est inhérente les fait rebondir, après les chocs, dans la mesure tout au moins où leur enveloppement dans un composé leur permet de rebondir après le choc.

Nous avons ici des chocs, des rebondissements, du mouvement, autant de phénomènes qui s'adaptent très bien à la conception qu'on se fait du son dans l'Antiquité. Les rebondissements évoquent les vibrations qu'on ne nomme pas encore ainsi, mais qui supposent le retour d'un mouvement sur lui-même, comme celui qu'effectue une corde pincée. Et si la présence de ces particules, les atomes, est atypique, elle permet de résoudre la question de la réflexion des sons, par analogie avec le choc mécanique. Enfin l'infinité des formes possibles de ces atomes ouvre la voie aux infinités de timbres sonores, à la fois hauteur et couleur, variables elles-mêmes dans le temps. Et Epicure peut alors écrire, sur l'audition<sup>138</sup> :

Voici maintenant comment l'audition est produite. On entend lorsqu'un courant est transmis à nous de celui qui parle, ou émet un son, un cri ou quelque affection auditive. Ce courant se répand en corpuscules homogènes, conservant ainsi entre eux une similitude d'impression et une unité propre tendant à l'émission de la voix et rendant claire et sensible l'impression qui en vient, ou, à tout le moins, manifestant l'existence hors de nous d'un objet sonore. En effet, sans une impression conforme à l'objet et venue de lui, un tel genre de perception n'existerait pas. Il ne faut donc pas s'imaginer que c'est l'air lui-même qui, sous l'effet de la voix émise ou de phénomènes semblables, forme ces images. Il est loin d'en être ainsi. Au contraire, en réalité, ce choc qui se fait en nous toutes les fois que nous émettons un son, c'est lui qui, par le moyen de corpuscules émis en un courant aérien, forme ce qui nous procure l'affection auditive.

L'approche atomiste concernant la physique du son est séduisante parce qu'elle semble résoudre la problématique de la propagation des sons, considérée comme un transport de corpuscules particuliers émis par les corps sonore et venant frapper l'organe sensoriel. Les lois de propagation appliquées dans la conception atomiste du son sont alors d'inspiration mécanique et justifient les phénomènes d'écho et de délai. D'autre part, grâce à la notion de forme qui fait des atomes de véritables véhicules d'informations, la théorie atomiste est la seule qui est capable de prendre en compte la différence de timbre caractéristique d'un son. En effet les autres théories, qu'elles soient basées sur les chocs ou sur les mouvements de l'air sont incapables de donner une explication cohérente de la conservation des caractéristiques sonores au cours de la transmission et notamment face aux obstacles rencontrés. Les simulacres ou 'eidola' de la théorie atomiste remplissent parfaitement cette fonction pour la vision puisque c'est justement la raison de leur existence. Les corpuscules sonores sont dotés des mêmes attributs. Fidèles images de l'ébranlement initial, ils se transportent jusqu'à l'oreille en gardant la finesse des détails ainsi que l'information de hauteur de son, ce qui permet de s'affranchir du problème de la vitesse de propagation. Alors Epicure peut renvoyer la théorie péripatéticienne des mouvements de l'air produits par le choc initial, qu'Aristote lui-même n'avait pas pu modéliser de façon correcte, puisqu'il en faisait un mouvement unique de la masse d'air. De plus Aristote et ses successeurs n'ont jamais pu donner d'explication sur la conservation des caractéristiques de timbre pendant la propagation.

<sup>137</sup> Diogène Laërce, *Vie des philosophes*, Chap. X, Epicure, trad. Robert Genaille, Paris, Garnier, 1933.

<sup>138</sup> *Ibidem*.

Il reste cependant une imprécision dans ce système des formes, car, à l'inverse de ce qui se passe pour la vision, dans laquelle les 'eidola'ne sont que des images immatérielles, dans le cas du son on est bien en présence de corpuscules circulant sous forme de flux. La dimension de ces corpuscules n'est pas précisée, et on est en droit de se demander ce qu'il en advient après leur perception. Y a-t-il une accumulation ? Dans ce cas elle suppose l'agglomération de ces atomes en corps matériels dont on n'a pas trace d'existence, ou alors leur transformation en substance inconnue mais forcément corporelle.

La physique d'Epicure est faite d'hypothèses et souffre de l'absence d'observations qui pourraient les soutenir. A la fois prémonitoires sur la constitution de la matière, et vouées à l'échec sur les simulacres, ses théories n'ont pas eu la possibilité d'être approfondies et corrigées, du fait de leur élimination pour longtemps par la pensée dominante à cause du matérialisme qu'elles véhiculaient.

Pourtant les idées atomistes sont largement diffusées et notamment chez les mécaniciens d'Alexandrie qui, à partir du III<sup>ème</sup> siècle av. J.-C., définissent l'air comme un élément matériel composé de particules immergées dans le vide. C'est ainsi qu'après Ctésibios, dont nous n'avons pas de trace écrite, Philon de Byzance introduit son ouvrage sur la pneumatique et l'hydraulique<sup>139</sup> :

Les savants pensent que l'air est composé de très légers corpuscules qui, à cause de leur petitesse, ne tombent pas sous le sens de la vue ni sous aucun autre sens, quand ils sont séparés, et que l'air n'est sensible alors que par sa force, mais qu'il n'en est plus de même quand ces corpuscules sont réunis. Des savants sont d'avis que le vide a une nature physique et qu'il se mélange au corps de l'air, à cause des corpuscules légers dont celui-ci est constitué, qu'il se mélange de même aux particules des liquides et des autres corps.

Plus tard, Héron d'Alexandrie renchérit dans son traité de pneumatique<sup>140</sup> :

Il en est qui affirment que rien dans l'univers n'est vide; d'autres estiment que le vide n'existe point naturellement d'une façon continue, mais qu'il se trouve réparti en particules ténues à travers l'air, l'eau, le feu, et les autres corps. C'est à cette opinion que nous nous rangeons [...]

Il est clair que, sans citer les références atomistes, on est bien ici en présence de cette théorie physique de la matière. Héron va d'ailleurs mettre en évidence l'existence du vide par des expériences sur les ventouses, ainsi que par la combustion de l'air. Etant avant tout des mécaniciens, concepteurs de machines, ces 'ingénieurs'ne s'inscrivent pas dans une démarche théorique et l'existence du vide ne sera pas développée de façon scientifique. Par la suite elle sera combattue par le dogme chrétien, notamment par Augustin, et on ne parlera plus du vide pendant longtemps.

## Lucrèce

Avec Lucrèce on en sait un peu plus sur la production et la propagation des sons. Il s'attarde sur la matérialité du flux sonore en invoquant les blessures subies par la gorge lorsque l'on crie, signe indéniable d'une perte de matière.

La voix souvent blesse la gorge et les cris irritent les canaux qu'ils parcourent. C'est qu'alors les atomes des sons, pressés trop nombreux dans un canal trop étroit, ne se ruent pas à l'extérieur sans déchirer l'orifice et sans endommager le conduit par où la voix gagne l'air. Il est donc impossible de douter que la voix et les paroles ne soient faites d'éléments corporels, puisqu'elles sont capables de blesser.

[...] La voix est donc nécessairement de nature corporelle, puisque parler beaucoup nous cause une perte de substance.

Voilà le problème de la matérialité des corpuscules sonores du point de vue de leur production, mais toujours pas de leur devenir. Peut-être doit-on croire que le cérumen soit une sorte de concentré d'atomes de son agglomérés..

Ensuite Lucrèce décrit dans sa langue de poète la différenciation des atomes sonores :

La rudesse de la voix vient de la rudesse des éléments et sa douceur vient de leur douceur. Car ce ne sont pas des atomes de même forme qui pénètrent dans les oreilles quand la trompette barbare fait entendre son grave et profond appel et que l'écho en renvoie le rauque gémissement, ou quand les cygnes nés dans les fraîches vallées de l'Hélicon jettent leur cri perçant et mélancolique.

<sup>139</sup> Philon de Byzance, *Le livre des appareils pneumatiques et des machines hydrauliques*, trad. Carra de Vaux, in *Notices et extraits de la Bibliothèque Nationale*, t XXXVIII, Paris, 1902.

<sup>140</sup> Héron d'Alexandrie, *Les pneumatiques*, trad. A Rochas, Paris, Masson, 1892.

Là où Aristote est incapable d'expliquer et de décrire les paramètres du timbre, c'est-à-dire de la 'couleur' des sons, l'atomisme propose une solution simple : le timbre est caractérisé par la forme des atomes de son, forme qui est conservée pendant toute la transmission.

Puis on aborde la question de la diffusion du son qui suppose un grand nombre de ces flux pour arroser un auditoire :

Il arrive souvent qu'un mot lancé par la bouche du crieur public frappe les oreilles de tout un peuple. En ce cas, une seule voix se divise sur-le-champ en une multitude de voix, puisqu'elle se répand dans un grand nombre d'oreilles et imprime à chacune la forme et le son distincts de chaque mot. Une partie des voix qui ne frappent point nos oreilles va au-delà et se dissipe dans les airs;

L'autre partie rencontre des obstacles et peut former l'écho sur lequel Lucrèce s'épanche un moment, le sujet se prête facilement aux élans lyriques du poète. Cependant il s'agit bien ici d'un problème rencontré par la théorie atomiste du son. Si des flux d'atomes de sons se propagent en toutes directions, la quantité d'atomes, et donc de matière, est considérable, et finalement très peu sont perçus par l'organe de l'auditeur. On revient sur la question de la quantité, de la dimension et de la masse de ces grains de son, et de leur devenir.

Revenant à la physique, Lucrèce explique la propagation des sons à travers les obstacles solides :

Il n'y a pas à s'étonner que des obstacles qui dissimulent les objets à nos yeux laissent cependant les sons passer et frapper nos oreilles. Il est possible d'avoir une conversation à travers des portes fermées, nous le constatons tous les jours. C'est que la voix peut sans risque traverser les canaux les plus sinueux des corps, au lieu que les simulacres s'y refusent et se déchirent, si les conduits ne sont pas rectilignes, comme le sont ceux du verre, à travers lequel vole toute image.

Les corpuscules sonores sont bien différents des simulacres de la vision, de nature corporelle mais de dimension très fine, ils s'insinuent dans les pores de la matière, ces espaces vides entre les atomes.

La propagation sphérique des sons s'explique par une mystérieuse multiplication de ces corpuscules qui se copient à l'infini :

La voix d'ailleurs se disperse en tous sens, car les sons s'engendrent les uns les autres; un son se multiplie amplement, comme l'étincelle éclate en gerbe de feu. Aussi les sons s'emparent-ils des espaces les plus cachés et tous les lieux d'alentour les renvoient en échos. Les simulacres au contraire se meuvent en droite ligne, tels qu'ils sont émis: c'est pourquoi l'on ne peut voir à l'intérieur, par-dessus une clôture, tandis qu'on entend au-delà. Et cependant la voix s'émousse en traversant les murs des maisons, arrive confuse aux oreilles et laisse alors percevoir des sons plutôt qu'entendre des mots.

Quelques uns de ces corpuscules sont arrêtés par les obstacles, et la précision des sons s'altère, ce qui suppose deux propositions, l'une sur l'intensité liée au nombre des corpuscules, l'autre sur la fragilité des corpuscules dont la forme porte la précision des sons. Encore une fois, chez Lucrèce comme chez Epicure, la théorie manque d'observations et du traitement approfondi des cas particuliers. Pourtant, après Aristote et Théophraste, la théorie atomiste des sons n'a pas été traitée par ses détracteurs, sans doute par manque de connaissance suffisante du sujet.

En résumé, la théorie atomiste de la propagation des sons se fonde sur l'existence du vide intercalaire entre les atomes constituant la matière, dans lequel se forme un flux de corpuscules de son dont la forme représente le timbre et le débit l'intensité. La hauteur du son pourrait être représentée par la vitesse de propagation, mais ce n'est pas explicitement énoncé. Le mouvement de l'air n'intervient pas, mais c'est un milieu favorable par la grande proportion d'espace vides dont il est constitué. La propagation se fait en tous sens, de façon sphérique, contrairement à la lumière qui se propage en ligne droite. Enfin les corpuscules de sons obéissent aux lois de la mécanique et rebondissent sur les corps durs pour former des échos.

Cette théorie sera éliminée et combattue dès les débuts de la pensée chrétienne, en raison de la supposition de l'existence du vide et de la nature discontinue de la matière. Il serait pourtant inexact d'attribuer le déclin de cette théorie uniquement à ses détracteurs. Si la théorie atomiste de la propagation des sons constitue une impasse, c'est en raison de son caractère hypothétique. Rien en effet ne vient corroborer les suppositions d'Epicure sur les corpuscules de son. Toute séduisante qu'elle apparaisse, cette spéculation souffre d'un manque d'observations et d'expériences. Par ailleurs le modèle pneumatique d'Aristote se développe parallèlement, et va trouver un appui certain avec de nombreux apports qui la rendent acceptable.

Néanmoins on trouvera, pendant tout le Moyen Âge, la Renaissance et le début du XVII<sup>ème</sup> siècle, un vocabulaire suggérant la nature percussive des flux sonores perçus par l'oreille.

Les successeurs d'Aristote ont eu besoin d'une théorie pour expliquer la propagation des sons sans transport de matière. Elle leur sera fournie, comme dans d'autres domaines, par la pensée stoïcienne.

## **Les stoïciens et l'ébauche de la théorie des ondes**

Nous savons peu de choses de la physique stoïcienne, encore une fois les textes originaux manquent, sans doute détruits par ses détracteurs. On sait que Chrysippe a écrit un nombre considérable d'ouvrages, dont plusieurs sur la physique. On trouve dans Diogène Laërce un aperçu de la physique stoïcienne, et quelques lignes sur la théorie des sons. Pour les stoïciens, la matière est continue et divisible. Le vide est un concept défini comme 'ce qui peut être contenu dans des corps mais qui n'en contient pas'. On connaît les antagonismes entre les Stoïciens et les Epicuriens, on en a ici un remarquable exemple.

Diogène Laërce décrit la conception stoïcienne de la voix (le son) qui est 'de l'air frappé', et dont la nature est corporelle. Il fait référence à un extrait du livre II de la *Physique* de Chrysippe qui traite de la vue et de l'ouïe. Cet extrait d'apparence anodine constitue le fondement d'une analogie qui sera féconde jusque dans la science moderne, sur la propagation des sons<sup>141</sup> :

On entend quand l'air placé entre celui qui parle et celui qui écoute est ébranlé en cercles concentriques et vient frapper les oreilles, comme l'eau d'une citerne est agitée d'ondes concentriques quand on y jette une pierre.

Cette image va accompagner, d'abord timidement, puis de façon beaucoup plus affirmée, toutes les théories de la propagation, jusqu'à proposer, puis imposer, le terme 'onde' en référence à la nature du phénomène aquatique qui en est le modèle.

La puissance de cette analogie n'est pas dans une explication du processus, totalement inexistante, mais dans l'observation simple d'un phénomène de propagation sans transport de matière. La lacune dans la description aristotélicienne du mouvement du son trouve enfin une solution qui ne contredit en aucune façon la description faite dans le *Traité de l'Ame*. En effet, le son est de l'air frappé, l'air lui-même est continu et divisible, sans vide, et le son se propage sans que la matière se déplace, comme l'eau qui forme des ronds lorsqu'on y a jeté une pierre. On est bien ici dans le déplacement de quelque chose d'immatériel, le déplacement d'une déformation. Aristote n'avait pas prévu ce type de mouvement dans ses catégories, et ce sont les stoïciens qui complètent ainsi sa physique.

Diogène Laërce a écrit probablement au III<sup>e</sup> siècle de notre ère, et son ouvrage est la seule source de cet extrait de la *Physique* de Chrysippe. On suppose que le célèbre biographe avait accès à ces textes introuvables aujourd'hui. Cependant trois siècles auparavant, on trouve chez Vitruve un exposé sur le phénomène sonore qui fait appel à cette analogie. Le livre V de son *Traité d'architecture* concerne les édifices publics, et parmi eux les théâtres auxquels il consacre trois chapitres. Vitruve parle longuement du traitement acoustique des lieux scéniques, et commence son exposé par une définition du son<sup>142</sup> :

Car la voix n'est autre chose que l'haleine qui étant poussée fait impression sur l'organe de l'ouïe, par le moyen de l'air qu'elle a frappé, dont l'agitation forme une infinité de cercles.

La traduction de Claude Perrault est précise car, s'il est architecte reconnu, il est également physicien et consacrera un livre entier à l'acoustique dans son traité de physique en quatre volumes, on y reviendra. Vitruve décrit ici de façon simple la proposition qu'Aristote avait maladroitement exposée dans le *Traité de l'Ame* : l'air subit une 'agitation' qui forme une infinité de cercles. Il poursuit :

Mais comme lorsqu'on jette une pierre dans un étang on voit qu'il s'y fait quantité de cercles qui vont toujours en croissant depuis le centre, et qui s'étendent fort loin s'ils n'en sont empêchés par la petitesse du lieu ou par d'autres obstacles ; et que s'ils rencontrent quelque chose, les premiers cercles qui sont arrêtés arrêtent et troublent l'ordre de ceux qui les suivent : ainsi la voix s'étend en rond et fait plusieurs cercles. Il y a pourtant cette différence que dans un étang les cercles ne se font que sur la surface de l'eau, au lieu que les cercles qui sont faits par la voix vont toujours en s'étendant, non seulement en largeur, mais même en profondeur, montant comme par degrés [...]

Vitruve s'est approprié ici l'analogie que nous attribuons, par l'entremise de Diogène Laërce, à Chrysippe. On sait que Vitruve, à l'inverse de nombreux hommes de l'art, avait reçu une solide éducation théorique, et il est probable que parmi ses lectures, les traités de physique des savants réputés figuraient en bonne place. Claude Perrault, dans sa traduction, commente ce passage par une très longue note qui lui permet

<sup>141</sup> Diogène Laërce, *Vie des philosophes*, Chap. VII, Zenon de Cittium, trad. Robert Genaille, Paris, Garnier, 1933.

<sup>142</sup> Vitruve, *Dix livres d'architecture*, trad. Claude Perrault, Paris, 1673, V, 3, p. 148.

de compléter et de corriger la conception antique de la propagation des sons. Cependant, avant de contester la validité rigoureuse de l'analogie avec les ronds dans l'eau, il admet que la comparaison est pertinente par son illustration d'un phénomène difficile à représenter.

En effet la comparaison est inexacte puisque les ronds dans l'eau sont produits par un mouvement ascendant du liquide consécutif à l'affaissement produit par la chute de la pierre, alors que le mouvement sonore de l'air est relatif à une compression, mais finalement le phénomène de propagation est bien analogue, il s'agit d'un déplacement de perturbation.

On retrouve cette représentation dans presque tous les ouvrages qui traitent de la nature physique du son à partir des premiers siècles. On constate que même les auteurs les plus fidèles à Aristote reprennent l'analogie, c'est dire l'importance de cette réponse à un problème qui est au cœur de l'acoustique physique.

Boèce a écrit au début du VI<sup>ème</sup> siècle son *Institutione Musica*. Cet ouvrage imposant qui traite surtout d'harmonie, va constituer le socle de la théorie musicale jusqu'à la Renaissance et au-delà. Dans un court chapitre du livre I, Boèce reprend la comparaison en la complétant d'intéressantes remarques<sup>143</sup> :

Parlons à présent de la manière dont nous entendons. On considère d'ordinaire qu'il advient aux sons ce qui se produit lorsqu'on lance, de haut, une pierre dans un étang ou dans des eaux dormantes. D'abord elle provoque une onde dans un cercle très petit, puis elle propage les orbes de ces ondes en cercles de plus en plus grands jusqu'au moment où le mouvement s'apaise, épuisé par la diffusion des flots. Et ainsi, de proche en proche, l'onde se répand sous l'effet d'une poussée toujours plus faible. Dès qu'un obstacle vient entraver l'accroissement des ondes, aussitôt le mouvement s'inverse et c'est comme s'il revenait au centre d'où il était parti, empruntant les mêmes ondelettes. Ainsi, dès lors que l'air frappé aura produit un son, il en ébranle un autre tout proche et provoque ainsi une sorte de flux d'air circulaire. C'est pourquoi il se répand et frappe en même temps l'ouïe de tous ceux qui l'entourent. Et le son est moins net pour celui qui se tient plus loin puisque l'onde d'air percuté qui lui parvient est plus faible.

Ce passage d'un Boèce qu'on n'aurait pas cru si physicien et observateur, est très intéressant. Il introduit une dimension dynamique dans la propagation, en insistant sur l'affaiblissement qui est conforme à celui subi par le son. Pour la première fois on décrit la réflexion de l'onde sur un obstacle, reproduisant la propagation de cercles. Enfin Boèce transpose la comparaison au son et décrit le flux formé par la succession de chocs de parties d'air conjointes, et conclut par la constatation de l'affaiblissement d'intensité provoqué par la perte de puissance.

Plusieurs siècles après Boèce, Thomas d'Aquin, autre pilier de la connaissance jusqu'à la Renaissance, commente Aristote en puisant des théories chez des auteurs plus récents, comme Themistius, Boèce et même Averroès qu'il combat pourtant. Dans le *Commenaire au Traité de l'Ame*, Thomas d'Aquin traite longuement du son dans deux leçons qui s'appliquent au chapitre 8 du livre II d'Aristote déjà commenté ici. Il n'hésite pas à reprendre à son compte l'analogie des ronds dans l'eau, puisée chez Boèce qu'il cite à plusieurs reprises. En effet, Themistius, qui constitue sa source essentielle d'inspiration, traite le chapitre de façon assez fidèle au texte d'Aristote et ne fait pas allusion à cette analogie<sup>144</sup>. Voici l'extrait du Commentaire au Traité de l'Ame de Thomas d'Aquin<sup>145</sup> :

[...] il peut en aller de l'affection de l'air, lors de la production du son, comme de l'affection de l'eau, quand une chose y est projetée. En effet, il se produit des ronds autour de l'eau frappée. Ceux-ci, près du lieu du coup, sont petits, et le mouvement est fort. Mais plus loin, les ronds sont grands, et le mouvement plus faible. Enfin, le mouvement s'évanouit totalement, et les ronds disparaissent. Si toutefois, avant que le mouvement ne cesse, les ronds rencontrent un obstacle, il se forme des ronds en sens contraire; et cela avec d'autant plus de véhémence qu'on est plus près du premier choc.

De même, doit-on comprendre, lors du choc sur des corps sonnants, l'air se meut en cercle, et le son se diffuse partout. Tout près, certes, les ronds sont plus petits, mais le mouvement plus fort : aussi le son est-il perçu comme plus fort. Mais au loin, les ronds s'agrandissent, le mouvement est plus faible, et le son s'entend plus obscurément. Enfin, tout disparaît.

Le texte est pratiquement le même que celui de Boèce vu plus haut. Dès lors cette analogie, même si elle n'explique pas le phénomène, fait l'unanimité chez les savants et on la retrouve dans toute la littérature de vulgarisation de l'acoustique. On doit à cette métaphore aquatique l'origine du terme 'onde' qui prendra une importance de plus en plus considérable dans l'Histoire de la Physique.

<sup>143</sup> Boèce, *De institutione musica*, trad. Christian Meyer, Turnhout, Brepols, 2004, liv. I, 14, p. 55.

<sup>144</sup> Themistius, *Themistii paraphrasis de anima*, Trévise, 1481, lib. II, cap. XXV-XXX.

<sup>145</sup> Thomas d'Aquin, *Commentaires au Traité de l'Ame*, trad. Y. Pelletier, Univ. Laval Québec, 2000, livre II, leçon 16, p.115.

## 6 - L'explication des phénomènes sonores de l'Antiquité Romaine au Moyen Âge

Les philosophes de l'antiquité ont cherché à décrire le phénomène physique de l'audition, de la production et de la propagation des sons. Ils élaborent des hypothèses à partir de quelques observations de sons élaborés, comme ceux des instruments de musique ou de la voix. Le domaine d'étude se limite à la perception et à l'harmonie, à l'occasion à la phonologie. Mais la nature également est productrice de phénomènes sonores, parfois purement imaginaires comme les sons des sphères célestes, et les Anciens tentent d'en expliquer les mécanismes. Il s'agit de l'orage, de l'écho, de certains sons curieux, mais également de circonstances particulières de propagation, comme dans les édifices. Les *Problemata* attribués à Aristote seront diffusés et commentés pendant tout le Moyen Âge. Ce recueil est riche de ces questions, et des réponses sont apportées, parfois contradictoires. D'autres textes nous indiquent les préoccupations que pouvaient ressentir quelques amateurs de questions scientifiques. C'est le cas de Plutarque, qui, dans les *Propos de table*, rapporte une conversation dont le sujet est la différence de propagation des sons le jour et la nuit. Dans un autre domaine, le grand théoricien de l'architecture, Vitruve, s'est penché sur l'acoustique architecturale des lieux de spectacle. Enfin de nombreux auteurs ont largement décrit des échos remarquables, ainsi que la curieuse statue de Memnon qui émet des sons à certaines heures de l'aube..

### Le mythe de l'Harmonie des Sphères

Il est impossible de traiter des théories de l'acoustique dans l'antiquité sans parler un peu de ce mythe qui accompagne l'Histoire des Sciences jusqu'à nos jours. Il est en effet encore raconté et colporté par des auteurs, plus romanciers que scientifiques, qui trouvent facilement un auditoire complaisant. Cependant ce mythe correspondait chez les Anciens à une interprétation du monde et des astres qui se fondait sur le nombre, et la perfection de l'harmonie convenait à la perfection divine.

On trouve les premières traces de ce mythe chez les pythagoriciens, puis plus tard chez les platoniciens. Cependant Platon ne fait que l'évoquer dans la *République* et dans le *Timée*<sup>146</sup>. Les néoplatoniciens forgeront la théorie à partir de ces allusions mystiques et obscures.

Rappelons en quelques mots l'essentiel de cette théorie. Les mouvements des corps produisent tous des sons, et d'autant plus intenses que leur masse est importante. Si les astres sont en mouvement, ils émettent donc forcément des sons, et comme les astres sont de l'ordre du divin, la combinaison de ces sons est forcément harmonieuse. Les coïncidences, comme souvent dans la numérologie des pythagoriciens, feront le reste (sept intervalles, sept sphères, etc.). En général on explique l'absence de la perception des sons célestes par leur intensité trop grande ou par la permanence de l'ambiance sonore qui nous les fait oublier, en quelque sorte par habitude. L'essentiel du travail des adeptes de l'Harmonie des Sphères consiste à déterminer les intervalles musicaux entre les planètes, et ainsi à justifier l'exactitude de l'harmonie musicale et des proportions mathématiques<sup>147</sup>.

Sans trop approfondir le sujet, notons que les principaux auteurs, outre les Pythagoriciens et Platon, déjà cités, sont Cicéron, dans le *Songe de Scipion* extrait de la *République*,<sup>148</sup> qui sera repris au III<sup>e</sup> siècle par Macrobie<sup>149</sup>, Pline dans son *Histoire Naturelle*<sup>150</sup>, puis les néo-pythagoriciens Nicomaque de Gêse<sup>151</sup>, Censorinus<sup>152</sup>, Aristide Quintilien<sup>153</sup>, et enfin Boèce qui s'inspire de Nicomaque, dans le *De institutione Musica*<sup>154</sup>. Ce dernier divise la musique en trois parties, la *musica mundana*, la *musica humana* et la *musica in instrumentis*, dont la première, la musique du monde, est consacrée à l'harmonie des sphères.

<sup>146</sup> Platon, *La République*, VII, 530 et *Timée*, 34-37.

<sup>147</sup> Le thème est traité de façon plus complète dans Dominique Proust, *L'harmonie des sphères*, Paris, Seuil 2001.

Il existe également un intéressant article de Théodore Reinach, *La musique des sphères*, in *Revue des études grecques*, XIII, 1900, p. 432-449.

<sup>148</sup> Cicéron, *La République*, trad. Nisard, Paris, 1850, VI, 13.

<sup>149</sup> Macrobie, *Summum scipionis*, II, 1 et 4.

<sup>150</sup> Pline l'Ancien, *Histoire naturelle*, II, 20 et 84.

<sup>151</sup> Nicomaque de Gêse, *Manuel d'Harmonique*, trad. Ch. E. Ruelle, in *Revue des Etudes Grecques*, XIV, 1880, p. 175-176.

<sup>152</sup> Censorinus, *De die natali*, trad. Mangeart, Paris, Panckoucke, 1843, XIII.

<sup>153</sup> Aristide Quintilien, *De musica*, trad. F. Duysinx, Liège, Droz, 1999, livre III, p. 190-192.

<sup>154</sup> Boèce, *De institutione musica*, I, 2 et 27.

Tous les auteurs du Moyen Âge d'inspiration platonicienne reprennent plus ou moins le mythe. Aux débuts de l'ère moderne on assiste à un retour de cette théorie, notamment avec l'*Harmonices mundi* (1619) de Kepler.

De nombreux musiciens s'inspirent du thème, notamment J.S. Bach, mais également Mozart, puis plus tard Gustave Holst dans ses célèbres *Planètes*<sup>155</sup>.

Cependant, dès l'origine de la diffusion de ce mythe, Aristote se déclare en opposition avec les Pythagoriciens et avec son maître Platon. Dans le *Traité du Ciel*, il fait un exposé complet de la théorie, avant de traiter avec peu de ménagements ses adversaires<sup>156</sup> :

Ces considérations montrent que la théorie suivant laquelle le mouvement des astres produit une harmonie, c'est-à-dire que les sons qu'ils émettent font un accord musical, en dépit de l'élégance et de l'originalité déployées par ses défenseurs, ne possède néanmoins aucune vérité. De l'avis de certains philosophes, en effet, il faut nécessairement que le mouvement de corps d'une grandeur aussi considérable produise un son, puisque c'est ce qui arrive même sur notre Terre, pour les corps qui sont loin de posséder de telles masses et une pareille vitesse de mouvement. Or quand le Soleil et la Lune, ainsi que les astres, si considérables qu'ils soient en nombre et en grandeur, se meuvent avec une telle rapidité, il est impossible <pensent-ils> qu'ils ne produisent pas un son prodigieusement fort. S'appuyant sur ces raisonnements et sur ce que les vitesses, dépendant des distances, possèdent les proportions des accords musicaux, ils assurent que le son émis par le mouvement circulaire des astres est une harmonie. Étant donné, cependant, qu'il paraît anormal que nous n'en percevions pas le son, ils en donnent pour raison que le son est en nous dès le moment de notre naissance, ce qui le rend indiscernable du silence, son contraire, son et silence se distinguant par le contraste. De même donc que les forgerons perdent par l'accoutumance tout sentiment de différence, de même en est-il précisément pour les hommes.

Après l'exposé de la théorie des partisans de l'harmonie des sphères, Aristote développe une argumentation en apparence plus rationnelle :

Mais, ainsi que nous l'avons dit plus haut, si mélodieuse et musicale que soit la théorie, il est impossible que les faits se passent de cette façon. Non seulement, en effet, il est étrange de ne rien entendre, ce à quoi ils s'efforcent de parer par leur explication, mais il y a encore ce fait que nous ne ressentons aucune modification, indépendamment même de la perception du son. Car les bruits excessifs brisent les masses des corps inanimés eux-mêmes : par exemple, le bruit du tonnerre fend les pierres et les corps les plus résistants. Or, pour des corps en mouvement si considérables, comme le bruit qui nous parvient est proportionnel à la grandeur du corps transporté, le son doit forcément arriver jusqu'à notre Terre avec une intensité mille fois plus grande que celle du tonnerre, et sa violence doit être d'une force inouïe.

Cette affirmation selon laquelle le tonnerre brise les pierres, et que donc le son des astres devrait être destructeur n'est bien entendu pas vérifiée, mais Aristote poursuit et se fait alors percutant pour les pythagoriciens :

En fait, il est bien facile d'expliquer pourquoi nous n'entendons rien et pourquoi nos corps ne subissent manifestement aucun des effets de la violence : c'est parce qu'il n'y a pas de bruit du tout ! Et en même temps que cette raison est évidente, elle témoigne en faveur de la vérité de nos propres explications. Car la difficulté qui est à l'origine des déclarations des Pythagoriciens sur la production d'une harmonie par le mouvement des astres confirme notre propre thèse. En effet, les corps qui sont eux-mêmes en mouvement produisent un son et un frottement, tandis que ceux qui sont fixés ou attachés à un corps en mouvement, comme dans un navire ses différentes parties, ne sont capables de produire aucun bruit, pas plus que ne le peut le navire dans une rivière où il est porté par le courant. Cependant les mêmes arguments permettraient de dire ici qu'il est absurde que, sur un grand vaisseau, le mouvement du mât et de la poupe ne fasse pas un grand bruit, et on pourrait en dire autant, à son tour, du vaisseau en mouvement. En réalité, ce qui produit un son, c'est un corps en mouvement, contenu dans un corps qui ne soit pas lui-même en mouvement ; mais s'il est contenu dans un corps en mouvement et continu avec lui, et ne produisant pas de frottement, aucun son ne peut se produire. Par conséquent, sur le fait qui nous intéresse ici, il faut dire que, si les Corps célestes se mouvaient dans une masse d'air ou de feu répandue partout, comme tout le monde le croit, leur mouvement causerait nécessairement un bruit d'une intensité extraordinaire, et ce bruit émis parviendrait jusqu'à notre Terre et nous mettrait en pièces. Si donc un effet de ce genre ne se produit manifestement pas, il en résulte qu'aucun des Corps célestes ne saurait se mouvoir, ni du mouvement des êtres animés, ni d'un mouvement forcé. Tout se passe comme si la nature avait sagement prévu ce qui doit arriver ; et, si leur mouvement s'accomplissait d'une autre façon, rien sur terre ne serait ce qu'il est.

<sup>155</sup> Voir à ce sujet Dominique Proust, *Astronomie et musique au siècle des lumières*, [www.peiresc.org](http://www.peiresc.org), 2000

<sup>156</sup> Aristote, *Du ciel*, Trad. J. Tricot, Paris, Vrin, 1986, II, 9.



Aristote retourne les thèses pythagoriciennes et les utilise pour développer sa proposition. C'est l'occasion de décrire ce type de mouvement particulier aux astres, le mouvement circulaire, continu, infini et sans frottement, sorte de mouvement idéal, ni mouvement violent, ni mouvement animé. C'est également une des raisons de l'introduction par Aristote des sphères intermédiaires, destinées à compenser les mouvements des sphères des astres.

Bien plus tard, Newton lui-même cédera à l'esthétique de cette théorie, en suggérant que Pythagore avait pressenti la détermination des distances des planètes au soleil grâce aux intervalles musicaux. Dans un ouvrage édité en 1978<sup>157</sup>, *Studies in musical science in the late Renaissance*, Daniel-Pickering Walker fait référence à une étude antérieure sur un texte de Newton jamais édité. Le physicien anglais y déclare que '*cet argument est subtil, cependant connu des anciens*', et que Pythagore, en l'appliquant aux cieux, comprit '*que les poids des planètes par rapport au soleil était réciproquement comme les carrés de leur distance au soleil*'.<sup>158</sup>

C'est sans doute un effet connexe de l'antiaristotélisme des savants du XVII<sup>e</sup> siècle qui permit à cette théorie d'inspiration idéaliste et poétique de faire son chemin et de trouver un écho favorable.

## **Les phénomènes sonores 'paranormaux'**

Au cours de l'Histoire des religions, on retrouve souvent des périodes où les 'grands prêtres' utilisent certains phénomènes naturels, et certaines manipulations techniques pour maintenir le peuple dans un état de soumission par la terreur que ces phénomènes entretiennent. On retrouvera ces pratiques à l'époque Baroque, avec les nombreux effets spéciaux conçus et parfois réalisés par des savants à l'imagination débridée, le plus prolifique étant sans doute le jésuite Kircher à la fin du XVII<sup>e</sup> siècle. Mais le XIX<sup>e</sup> et le XX<sup>e</sup> siècles ont également vu se développer ces mystifications favorisées par la grande diffusion médiatique dont elles peuvent profiter. Chez les Anciens la pratique était fréquente, on ne retiendra que quelques exemples, un phénomène naturel, la statue de Memnon, et les nombreuses machines inventées notamment à Alexandrie.

### **La statue de Memnon**

A proximité du site de Thèbes, en Egypte, se dressent deux colosses de pierre, vestiges d'un très grand temple en l'honneur d'Aménophis III. Strabon raconte qu'en 27 avant notre ère, un tremblement de terre détruisit en partie une de ces statues. Depuis de nombreux témoignages font état de manifestations acoustiques au lever du soleil, la statue chante, certains disent qu'elle parle. Devenue véritable attraction touristique à l'époque de l'occupation romaine, la statue, entre temps dédiée à Memnon, personnage de l'antiquité grecque, reçoit un grand nombre d'inscriptions gravées sur la pierre, en grec et en latin. La statue a été reconstruite sous le règne de Septime Sévère, au début du III<sup>e</sup> siècle, et depuis elle ne chante plus. Plusieurs auteurs grecs et romains relatent l'audition de ces sons, certains parlent de voix, voire de phrases. Plusieurs auteurs du XIX<sup>e</sup> siècle, spécialistes de l'Egypte ancienne et de l'Antiquité, ont étudié cette histoire, à travers les textes, les relevés des inscriptions et les observations sur le site. On écrit beaucoup et on polémique pendant des années<sup>159</sup>.

Certains de ces commentateurs pensent que les 'paroles' étaient produites de façon artificielle par des prêtres, probablement par un mécanisme de type automate, mais il est plus probable que les histoires sur ces voix tiennent plus de la légende que de l'observation<sup>160</sup>. C'est que les nombreux pèlerins venaient y entendre les

<sup>157</sup> Daniel-P. Walker, *Studies in musical science in the late Renaissance*, Warburg Institute, London, 1978, p 25-26.

<sup>158</sup> D.-P. Walker relève : 'Comme l'ont montré P.-M. Rattansi et J.-E. McGuire dans un brillant article ("Newton and the 'Pipes of Pan'", *Notes and Records of the Royal Society of London*, XXI, 1966, p 108-143), Newton, comme Francis Bacon, considérèrent très sérieusement les légendes de l'antiquité, et crurent la tradition de l'ancienne sagesse, dont les vérités profondes sont cachées sous le voile de fables. Dans les années 1690, il était au travail sur un ensemble de scholiae pour un projet jamais publié de la seconde édition des *Principia*. Dans ceux-ci, un de ses intérêts primordiaux était de trouver des anticipations de ses propres découvertes scientifiques dans les écrits sauvegardés des anciens théologiens, les *prisci theologi*, et dans les fables de l'antiquité. Parmi ceux-ci, il trouva, à sa grande satisfaction, la loi, qui était sienne, du carré inverse de la gravitation universelle, et il la trouva dans la version de l'histoire des marteaux de Pythagore donnée par Macrobius, qui bien entendu relie cette découverte d'ordre musical à la doctrine pythagoricienne de l'harmonie des sphères'.

<sup>159</sup> L'étude la plus sérieuse et la plus documentée semble être celle de A.J. Lettrone, *La statue vocale de Memnon*, Paris, Leroux, 1881. Plus récemment a été éditée une nouvelle étude sur le sujet : André et Etienne Bernard, *Les Inscriptions grecques et latines du colosse de Memnon* in Bulletin de l'Institut français d'archéologie orientale, 31, Paris, 1960.

<sup>160</sup> Le point de vue considérant la présence d'une machination est défendu par L. M. Langles, dans un commentaire de la traduction de Norden, *Voyage d'Egypte et de Nubie*, Paris, Didot, 1798, t. II, p. 157-256.

oracles, et il est clair que la mystification était largement entretenue. D'ailleurs, au XVII<sup>ème</sup> siècle, Kircher s'attarde sur le problème et propose une reproduction de la statue chantante grâce à un mécanisme de tête parlante.

Il est convenu de nos jours, d'attribuer le phénomène sonore à des dilatations fortuites, liées à une variation de température, de la quartzite utilisée pour la fabrication des statues. On peut donc raisonnablement penser que les sons entendus, grincements ou craquements se produisant au lever du soleil, étaient provoqués par des déformations et des mouvements de glissement consécutifs, amplifiés par quelque cavité dans la masse.

On retiendra de ce phénomène sonore inexplicable l'absence totale de recherche raisonnée, même de la part de savants, sur son origine. On assiste ici à une impuissance de la science à appréhender le son d'une façon physique, et à un recours facile à l'irrationnel favorisé par un mysticisme ambiant bien pratique pour éluder les questions sans réponse évidente.

### **Des solutions à quelques problèmes acoustiques**

On l'a vu, l'étude physique du son est peu abordée car le phénomène est difficile à représenter. Néanmoins les nombreuses manifestations sonores ont forcément donné lieu à des descriptions et à des tentatives d'explication. Certaines sont vérifiées, comme l'écho, d'autres sont plutôt imaginées, et c'est intéressant parce que l'audition, comme tous les sens, n'est pas une grandeur mesurable, mais une impression dont la mesure est entachée par l'imprécision des sens. On sait en effet que l'imprégnation diminue la sensibilité à l'intensité dans le temps, et que l'imagination joue un grand rôle dans la perception, en particulier dans l'audition. Par ailleurs l'absence de vocabulaire commun rend la qualification des sons très imprécise.

### **La propagation du son le jour et la nuit**

C'est ainsi que des débats apparaissent, qui nous semblent anodins mais qui ont agité la communauté des scientifiques jusqu'au XIX<sup>ème</sup> siècle, comme la différence de propagation des sons le jour et la nuit, la nuit étant supposée favorable.

On trouve dans les *Problemata*, une question à ce sujet<sup>161</sup> :

Pourquoi les sons s'entendent-ils mieux la nuit que le jour ? Est-ce, comme le prétend Anaxagore, parce que dans la journée l'air échauffé par le soleil siffle et émet des sons, alors que durant la nuit le calme règne du fait de la disparition de la chaleur, et qu'il est plus facile d'entendre quand il n'y a pas de bruit ? Ou est-ce parce qu'il est plus facile d'entendre dans ce qui est plus vide que dans ce qui est plein ? Or durant le jour, l'air est plus dense parce qu'il est rempli par la lumière et les rayons, alors qu'il l'est moins la nuit du fait que l'ont quitté le feu et les rayons qui sont des corps matériels.

On a droit ici à deux conceptions de la matière, celle d'Anaxagore, fondée sur le feu et la chaleur qui cause le mouvement, et celle de Démocrite qui distingue l'air matériel du vide ambiant dans lequel le son se propage. Mais le bon sens prévaut, et c'est une explication qui fait appel à l'imprécision des sens qui est maintenant exposée :

Ou est-ce parce que, pendant le jour, les objets matériels attirent la pensée vers beaucoup de choses, ce qui ne favorise pas l'audition, et parce que nous faisons tout ce que nous avons à faire plutôt le jour que la nuit, que la pensée se concentre sur les actions à effectuer et que la sensation séparée de la pensée se concentrant sur les actions à effectuer a un rôle en quelque sorte imperceptible, suivant la formule : "c'est l'intellect qui voit et c'est l'intellect qui entend".

La nuit, comme la vue n'a rien à faire et que la pensée est plus au calme, le conduit de l'audition, qui est plus ouvert, est capable, exactement comme le jour, de recevoir les sons, mais il transmet mieux le message à la pensée, parce que celle-ci n'est pas occupée et qu'elle n'est pas distraite par la vision comme durant le jour.

Selon la doctrine aristotélicienne, la sensation est subordonnée à l'intellect, et l'imprécision des sens est ici confirmée. Le même thème est développé par Plutarque, dans une conversation de convives extraite des *Propos de tables*. Ce récit d'une discussion animée entre personnes cultivées et connaissant bien les différentes philosophies, est l'occasion d'aborder plusieurs théories de la propagation des sons, et c'est un document intéressant à ce titre. On peut situer cette histoire vers la fin du premier siècle.

---

Langles va jusqu'à décrire, s'inspirant sans doute de Kircher, un instrument produisant de tels sons. Langles a été suivi par J.E. Salverte dans un ouvrage condamnant les procédés magiques utilisés par les religions, *Des sciences occultes ou Essai sur la Magie*, Paris, Sedillot, 1829, t. II, p. 353-372.

<sup>161</sup> Pseudo Aristote, *Problemata*, trad. Pierre Louis, Paris, Les Belles Lettres, 1993, t. 2, XI, 5 et 33, p. 9 et 20.

L'hôte, Ammonius, pose le problème et apporte un élément en s'appuyant sur Empédocle : la baisse de sensibilité de la vue dans le noir favorise une augmentation de celle de l'ouïe. Un premier convive, Boethus, prend la parole et développe le point de vue atomiste représenté alors par Epicure<sup>162</sup> :

«Ce qui est, se meut au sein de ce qui n'est pas.» Car il y a beaucoup de vide répandu et mêlé parmi les atomes de l'air. Lors, donc, que l'air est dilaté, et que par suite de sa raréfaction il se répand et circule davantage, de petits, d'imperceptibles vides restent entre ses parties, et les parcelles d'air, disséminées dans ces vides, occupent beaucoup de place. Mais quand ils sont resserrés, qu'il s'en fait une condensation sous un petit volume, et qu'ils viennent à s'entasser par force les uns contre les autres, ils déterminent au dehors un large espace et des séparations considérables. Cet effet a lieu la nuit à la suite du froid [...]

Dans la théorie atomiste, le son se propage sous forme de corpuscules dans un espace vide. Si l'air composé d'atomes a tendance à se contracter, et donc à resserrer ses atomes, l'espace vide augmente et favorise la propagation des sons, ce qui se passe la nuit en raison de la baisse de température. Le narrateur prend alors la parole, et invoque la théorie aristotélicienne<sup>163</sup> :

[...] quand vous attribuez à ce même vide la propriété de conserver le son, de le propager, vous n'êtes plus dans le vrai. Car ce fait, de n'éprouver aucun contact, aucune modification, aucune percussion, est spécial au silence et à l'immobilité. Or la voix est la percussion d'un corps qui a de la sonorité ; et pour qu'un corps ait de la sonorité, il faut qu'il ait de l'analogie et de l'accord avec lui-même, qu'il soit facile à mouvoir, léger, uni, qu'il réponde docilement aux impressions à lui transmises par l'intensité et par la continuité de ses parties. Il en est ainsi de l'air qui nous environne.

[...] Il n'y avait donc pas besoin de faire jouer à la nuit un rôle laborieux en voulant qu'elle étreigne et comprime l'air qui circule pendant sa durée, et en laissant ailleurs des espaces et des vides : comme si l'air était un obstacle à la voix et en altérerait l'essence, lui qui en est l'essence même, et la forme et l'agent!

On distingue très nettement les deux théories en présence à cette époque, l'une atomiste qui a besoin du vide comme 'milieu' d'évolution des atomes de la matière, y compris de l'air, l'autre continuiste, dans la tradition d'Aristote, qui attribue à l'air un rôle primordial dans la propagation des sons. Après avoir justement argumenté que le son devrait alors mieux se propager pendant les nuits chaudes qu'au cours de journées froides, le débateur invoque Anaxagore pour expliquer le phénomène<sup>164</sup> :

Ce philosophe dit que le soleil imprime à l'air un mouvement tremblant et convulsif, comme il se voit par cette petite limaille, par ces fragments qui voltigent incessamment à travers les rayons de lumière, et que quelques-uns appellent "tiles". Il dit que ces atomes, en sifflant et en murmurant sous l'action de la chaleur, rendent les voix plus malaisées à entendre le jour, tandis que la nuit ils cessent de s'agiter et de retentir.

On remarque la référence à Anaxagore, commune avec le texte de la question des *Problèmes* citée plus haut. C'est donc une perturbation sonore provoquée par les éléments d'air chauffé qui s'opposerait à la progression des sons la journée. L'hôte Ammonius prend à son tour la parole et réfute les deux théories<sup>165</sup> :

Peut-être paraîtrons-nous ridicules, nous qui croyons pouvoir réfuter Démocrite, et qui voulons réformer Anaxagore. Cependant il faut enlever aux atomes de ce dernier leur sifflement, qui n'est ni vraisemblable ni nécessaire. Il suffit qu'ils tremblotent et qu'ils exécutent un mouvement de rotation dans les flots de la lumière, pour que souvent ils dissipent et atténuent les sons. L'air, comme il a été dit, sert de corps et de substance à la voix. S'il est tranquille, il répand au loin, d'une manière directe, unie et continue, les parcelles et les mouvements de tout bruit. L'absence de vent et le calme le rendent parfaitement sonore; et l'effet est réciproque.

Car souvent l'agitation de l'air ne permet pas même que la forme de la voix arrive, bien expresse et bien articulée, jusqu'à l'organe auditif. Cette agitation lui fait perdre une partie de sa plénitude et de sa grandeur. La nuit, au contraire, n'a par elle-même aucune cause qui soit capable de rendre l'air agité; tandis que le jour en a une, qui y est grandement propre : c'est le soleil, comme l'a dit Anaxagore lui-même.

Ce ne sont donc pas les sifflements de l'air consécutifs à la chaleur du soleil, mais bien le soleil lui-même qui produit une agitation de l'air qui perturbe le mouvement du son, toujours selon Anaxagore qui décidément a la faveur de nos convives..

<sup>162</sup> Plutarque, *Les symposiaques, ou propos de table*, VIII, 3.

<sup>163</sup> *Ibidem*.

<sup>164</sup> *Ibid.*

<sup>165</sup> *Ibid.*

Thrasylle, le fils d'Ammonius prend alors la parole :

Par Jupiter, dit-il, quelle est, à ce compte-là, notre disposition d'esprit quand nous attribuons cet effet aux mouvements invisibles de l'air, et quand nous négligeons de faire intervenir l'agitation visible et les déchirements qu'éprouve ce même air ! [...] Avec le jour les humains conçoivent des pensées nouveaux, ainsi que le dit Démocrite, et ils inaugurent des besoins telles que le bruit et l'action sont loin d'en être bannis. [...] parce que c'est alors que l'on commence à entendre et à parler. Mais comme l'air de la nuit est d'ordinaire exempt d'agitation et de tumulte parce que tout repose, il est vraisemblable qu'il apporte à notre oreille la voix tout entière sans que rien en brise ou en altère l'explosion.

On revient ici aux conditions environnementales à l'origine du phénomène, c'est le bruit ambiant qui perturbe la propagation des sons. Et le débat est conclut d'une réflexion presque d'ordre psychologique avec une évocation du rôle de l'imagination dans la perception<sup>166</sup> :

Alors Aristodème de Chypre, qui assistait à l'entretien, prit la parole: Faites attention, Thrasylle, que les combats de nuit et les marches nocturnes des grandes armées pourraient bien vous démentir. Car les voix n'y sont pas moins bruyantes, malgré le trouble et l'agitation de l'air. La cause en tient aussi, pour une part, à nous-mêmes. Quand nous parlons la nuit, le plus souvent c'est avec une sorte de désordre et sous l'empire de quelque émotion. Soit que nous donnions un ordre, soit que nous interrogeons, notre voix acquiert alors beaucoup d'intensité. Par cela seul que dans des moments tout exprès consacrés au repos par la nature nous nous trouvons debout pour agir et pour parler, notre situation n'est rien moins que calme : c'est un état forcé, dans lequel le besoin où nous place quelque grande conjoncture donne de la précipitation à tous nos actes. Il s'ensuit qu'alors notre voix et nos paroles s'échappent aussi avec plus de véhémence.

Ce récit qui montre la faiblesse de l'état des connaissances sur la nature du mouvement sonore vers le premier siècle, s'achève donc sur le constat de l'impuissance des sens à mesurer les grandeurs physiques. Cette idée sera au centre de la démarche des scientifiques de la révolution du XVIII<sup>e</sup> siècle, qui s'attachera à élaborer des méthodes d'observations objectives, indépendantes des conditions environnementales et de la subjectivité portée par les émotions.

## Le son du dehors et le son de l'intérieur

Une autre question qui fait débat, c'est la différence de perception des sons, d'une intensité supposée égale, suivant qu'ils proviennent du dehors ou de l'intérieur d'une maison. Cette question était justement en préambule de la discussion précédente, dans les *Propos de table* de Plutarque<sup>167</sup> :

Un bruit violent, comme nous soupions à Athènes chez Ammonius, vint à retentir dans toute la maison. C'étaient des gens qui, du dehors, demandaient à grands cris le préteur : Ammonius venait d'être promu à cette charge pour la troisième fois. Quand il eut envoyé quelques-uns de ceux qui l'entouraient faire cesser le tapage et congédier la foule, nous nous mîmes à chercher pourquoi ceux qui sont dedans entendent ceux qui sont dehors, mais pourquoi ceux du dehors n'entendent pas aussi bien ceux du dedans. Ammonius dit que ce fait était expliqué par Aristote : que la voix des personnes renfermées sortant dehors au milieu d'un grand espace d'air très libre, s'évanouit aussitôt et se disperse, mais que celle qui de dehors pénètre dedans, au lieu d'éprouver un effet semblable, se maintient, et demeure parfaitement distincte.

La référence à Aristote vient directement d'une question des *Problèmes*, qui traite précisément de ce sujet. Nous avons vu que ce texte est postérieur à Aristote<sup>168</sup>.

Pourquoi entend-on mieux les bruits extérieurs quand on est dans une maison que les bruits intérieurs quand on se trouve à l'extérieur ? Est-ce parce que de l'intérieur le son se disperse dans l'espace, si bien que chaque détail ne peut pas être entendu, ou l'est moins ? Au contraire, du dehors vers l'intérieur, la voix passant dans un lieu plus réduit et rencontrant un air stable, pénètre sans se disperser, si bien qu'étant plus forte elle s'entend mieux.

On voit comment les nouvelles lois de ce mouvement particulier du son commencent à s'établir. La représentation du mouvement sonore, comme une sorte de sphère qui s'accroît avec la distance, prend forme et on imagine mieux les conséquences mécaniques de ce type de mouvement. On est loin ici de la balistique et de ses trajectoires, mais on est également loin de la théorie corpusculaire qui éprouvera des difficultés sur cette question de la dispersion, on le verra.

<sup>166</sup> *Ibid.*

<sup>167</sup> *Ibid.*

<sup>168</sup> Ps Aristote, *Problèmes*, XI, 37, p 22.

## L'acoustique architecturale

Les *Problèmes* d'Aristote, quels qu'en soient les auteurs, sont d'une grande richesse parce qu'ils traitent de questions très pratiques, sur des sujets de vie quotidienne, ce qui contraste avec la hauteur de vue à la quelle nous ont habitué les philosophes grecs. Quelques-unes de ces questions traitent de sujets anecdotiques, comme le crépitement du sel jeté dans le feu, l'affaiblissement de la perception auditive quand on baille, la déformation de la voix lorsqu'on est ivre, l'apparition progressive de bruits lorsque les objets vieillissent, ou encore pourquoi l'homme est le seul animal à bégayer... Mais quelques questions portent sur la sonorité des constructions.

L'architecture au sens large a une grande influence sur la propagation des sons, que ce soit par les différences de volume, par la disposition des éléments, ou par les innovations qui sont apparues à cette époque pour favoriser l'audition dans les grands espaces et notamment dans les théâtres.

Parmi les problèmes posés, on se pose la question de l'amortissement des sons quand le sol est jonché de paille. On attribue la cause de ce phénomène à la rugosité de la surface qui gêne la réflexion, comme pour la lumière, au contraire des surfaces lisses. A l'inverse, une autre question, avec la même réponse, porte sur la sonorité des maisons dont on a récemment refait les enduits muraux.

Mais la grande innovation, en matière acoustique, de l'antiquité grecque, c'est l'installation de cavités de formes et de dimensions diverses, qui rendent les lieux 'plus sonores'<sup>169</sup>:

Pourquoi, si l'on enfouit une grande jarre ou des vases d'argile vides et qu'on les ferme avec un couvercle, les édifices sont-ils plus sonores, et également s'il y a dans la maison un puits ou une citerne ? Est-ce parce que du fait que l'écho est une réflexion, il faut que l'air enfermé s'accumule et que la surface contre laquelle il se réfléchira en la heurtant soit dense et lisse ? Car ainsi l'écho est alors à son maximum. Donc le puits et la citerne présentent étroitesse et concentration, les vases et les jarres d'argile la densité de leurs contours, si bien que les uns et les autres contribuent au résultat en question. Car les objets creux résonnent mieux. Et c'est pourquoi le bronze est plus sonore que le reste. Que l'on utilise des objets enterrés n'a rien d'étonnant car la voix ne se porte pas moins vers le bas. D'une manière générale elle semble se propager de tous les côtés, et en cercle.

En parcourant les différentes questions, on a vraiment l'impression que plusieurs auteurs différents ont écrit ces pages. En effet, on a ici quelques contradictions avec les propositions exprimées dans d'autres problèmes. Néanmoins l'idée développée ici est que la concentration de l'air dans un lieu confiné favorise l'intensité, sans doute plus par conservation que par amplification. A ce sujet il convient d'observer que jusqu'à l'invention de l'amplification électronique au début du XX<sup>e</sup> siècle, l'augmentation d'intensité sera toujours réalisée par une diminution de l'affaiblissement sonore lors de sa propagation. Ici le processus est représenté sous l'appellation générale de réflexion, et donc par le terme d'écho qui en est la manifestation évidente. Nous avons ici la certitude que la pratique des résonateurs était courante dès le III<sup>e</sup> siècle av. J.-C., et pas seulement dans les théâtres. Gardons-nous cependant d'en attribuer l'invention à Aristote.

La technique était même assez éprouvée, puisque dans une autre question on traite de la meilleure façon d'installer ces *echiea* :

Pourquoi l'écho est-il meilleur si l'on enfouit les vases que si on ne les enfouit pas ? Est-ce parce que, s'ils sont recouverts de tous côtés, ils sont plus à même de recevoir et de garder l'air ? La conséquence est aussi que le coup a plus de force.

Il s'agit ici du coup de l'air extérieur sur l'air confiné. Rappelons que la théorie de ces résonateurs ne sera exposée clairement que vers 1860 par Helmholtz. Cependant Vitruve (1<sup>er</sup> siècle), dans son *Traité d'architecture* en fait une description très technique, au sujet de la construction des théâtres.

## Vitruve et l'acoustique des lieux scéniques

Vitruve a vécu à Rome au premier siècle avant notre ère. Ingénieur, bâtisseur et architecte, il construit des aqueducs, des édifices publics et des théâtres. Il est l'auteur d'un célèbre '*Traité d'architecture*' qui nous est parvenu intégralement. L'ouvrage a été édité à Rome en 1486 et traduit en français en 1547. En 1673 paraît une nouvelle traduction française par Claude Perrault, médecin, architecte du Roi et membre de l'Académie des Sciences<sup>170</sup>.

Dans ce traité, Vitruve consacre un long passage à l'acoustique des lieux scéniques dans lequel il développe une théorie assez élaborée de la physique des sons. On lui doit notamment la première énonciation

<sup>169</sup> *id.* XI, 8, p. 11.

<sup>170</sup> Vitruve, *Dix livres d'architecture*, trad. Claude Perrault, Paris, 1673.

claire, d'inspiration stoïcienne, de l'analogie de la propagation des sons avec les ondes à la surface de l'eau après qu'on y a jeté une pierre.

Le livre V est consacré aux édifices publics. Vitruve y décrit avec précision la meilleure façon de construire les forums, les basiliques, la prison, le trésor et l'hôtel de ville. Plusieurs chapitres sont consacrés aux théâtres, et à cette occasion, Vitruve énonce certaines règles à respecter pour que les spectateurs puissent entendre le jeu des acteurs avec la plus grande clarté, en tous points des gradins. Après un bref, mais essentiel, exposé de sa théorie de la propagation de la voix, l'architecte entreprend un résumé complet de la théorie harmonique d'Aristoxène. Ce passage pourrait paraître hors du sujet, mais il est nécessaire à l'introduction des éléments indispensables à une bonne acoustique, les fameux vases, autrement appelés *echeia*. La technique est ancienne, elle vient des grecs, on suppose vers le III<sup>e</sup> siècle. Le principe est maintenant connu, Helmholtz en a fait l'analyse théorique dans son ouvrage, il s'agit des résonateurs accordés<sup>171</sup>. Chaque vase, d'airain ou de terre est de forme plus ou moins sphérique, Vitruve n'en parle pas, avec sans doute une ouverture plus petite que le diamètre. Ces appareils sont disposés dans des niches à mi-hauteur des gradins, entre les sièges, horizontalement, l'ouverture dirigée vers la scène. Leurs dimensions sont établies par les règles harmoniques, c'est-à-dire qu'ils sont accordés par quarte et quintes successives, donc également par octaves. Les plus grands, qui sonnent le plus grave, sont disposés aux extrémités des gradins, et sont disposés à distance régulière, de plus en plus petits, donc de plus en plus aigus, à mesure qu'ils sont proches du centre. Dans les théâtres de grande dimension on ajoute deux autres séries de vases accordés selon des intervalles correspondant aux genres enharmonique et chromatique. Vitruve explique ainsi le dispositif<sup>172</sup>:

Cette disposition des vases d'airain fera que la voix qui viendra de la scène comme d'un centre s'étendant en rond frappera dans les cavités des vases et en sera rendue plus forte et plus claire selon la consonance et le rapport que son ton aura avec quelqu'un des vases.

Vitruve décrit cette technique très élaborée et en usage en Grèce, alors qu'il reconnaît plus loin qu'elle n'est pas appliquée dans la construction des théâtres romains. Il explique ce fait par leur petite dimension et par le matériau utilisé, bois plutôt que pierre, qui rend inutiles de tels dispositifs par la résonance naturelle que le bois procure. Il cite cependant Memmius qui a récupéré de tels vases lors de la démolition d'un théâtre grec, et on peut penser que Vitruve envisage d'utiliser ces techniques dans un proche avenir. En effet à cette époque les grands édifices romains n'avaient pas encore vu le jour.

Claude Perrault, dans sa traduction de 1673 ajoute de nombreux commentaires très enrichissants et corrige un certain nombre d'erreurs de transcription. Il y joint en outre un certain nombre de croquis facilitant la compréhension de la disposition des éléments de construction du théâtre.

Vitruve nomme ces vases '*echeia*', mais il semble que ce terme s'applique plutôt à des instruments de musique de la Grèce ancienne, composés de séries harmoniques de corps creux métalliques que l'on frappait d'une baguette<sup>173</sup>. Il semble que dans son application architecturale les grecs employaient le terme 'vase'.

Il est curieux de constater que ce procédé n'avait fait l'objet d'aucune description par les auteurs grecs, on y perçoit le peu d'intérêt qu'ils apportaient à la technique en général. On trouve une allusion à ces vases dans les *Problèmes* du pseudo-Aristote<sup>174</sup>, ce qui laisse penser que cette technique était très pratiquée en Grèce, et peut-être pas seulement dans les théâtres.

On a retrouvé dans de nombreux édifices religieux du Moyen Âge occidental de tels vases acoustiques, mais organisés en petites séries de quatre ou cinq éléments, et en général à une grande hauteur, ce qui ne les rendait sans doute pas très efficaces. Il est probable que la transmission des connaissances ne s'était pas accomplie d'une façon rigoureuse. Curieusement ils apparaissent vers le XI<sup>e</sup> siècle et sont utilisés jusqu'au XVII<sup>e</sup> siècle, sans que l'on connaisse les raisons de l'apparition et de la disparition de ces pratiques. Il semble que les polémiques, encore d'actualité, au sujet de leur efficacité soient très anciennes, on en a une trace dans un document de 1432 du couvent des Célestins de Metz<sup>175</sup>. L'intérêt historique pour ces cavités acoustiques s'est manifesté surtout à partir de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, avec les travaux, chacun dans son domaine, de Viollet Leduc et d'Helmholtz. On ne savait pas, jusque-là, comment fonctionnaient ces dispositifs. Certains affirmaient qu'ils étaient destinés à provoquer des échos, d'autres à atténuer la réverbération. L'explication physique du processus d'amplification sélective dans ces résonateurs n'est apparue qu'avec Helmholtz qui a fait l'expérience

<sup>171</sup> H. Helmholtz, *Théorie physiologique de la musique*, Paris, Masson, 1868.

<sup>172</sup> Vitruve, *Dix livres d'architecture*, trad. Claude Perrault, Paris, 1673, V, 5, p. 158.

<sup>173</sup> Voir à ce sujet l'article d'E. Saglio, in Charles Daremberg, *Dictionnaire des antiquités grecques et romaines*, Paris, Hachette, 1877, art. '*echeion*'.

<sup>174</sup> Ps-Aristote, *Problemata*, XI, 8.

<sup>175</sup> Voir à ce sujet la thèse de Victor Desarnaulds, *De l'acoustique des églises en Suisse*, Lausanne, 2002, p 118-119.

des résonateurs accordés, sorte de cavités sphériques prolongées par un tube très court d'un côté et d'une ouverture de l'autre, qui, lorsqu'elles sont appliquées à l'oreille, filtrent, selon les dimensions, certaines composantes harmoniques du son ambiant et les amplifient. De temps à autre, les acousticiens architecturaux contemporains qui, finalement, conçoivent de façon largement empirique, réintroduisent ces procédés dans leurs projets.

Cependant, malgré la grande complexité de l'acoustique architecturale, du fait de la multiplicité des paramètres qui semblent parfois insignifiants, quelques lois se dégagent et selon les exigences des donneurs d'ordre, les édifices publics sont construits de façon à rendre un effet acoustique souhaité d'une façon efficace. Les édifices religieux en sont les témoins, suivant que la priorité est donnée à l'intelligibilité ou à l'ambiance sonore. C'est ainsi qu'aux débuts de la religion chrétienne les édifices sont relativement peu élevés, les voûtes sont circulaires ainsi que les absides, l'acoustique privilégie alors la parole de l'officiant. En revanche, les églises gothiques favorisent, par les formes et les dimensions de la nef, les réverbérations longues propres à créer une ambiance sonore troublante, voire effrayante, ce qui était le but recherché. On inventera alors les chaires élevées et couvertes d'un abat-voix qui permettent la diffusion de la parole quand celle-ci doit être correctement écoutée, lors des prédications ou des lectures. Certains effets de focalisation sont également mis en oeuvre, grâce à des éléments de construction circulaires ou paraboloides, de façon à diriger un flux sonore dans une direction précise.

### Le retard du son sur la vision

Les phénomènes qui ont lieu pendant l'orage sont souvent invoqués pour traiter de la différence de propagation entre la lumière et le son. La corrélation entre les deux phénomènes est établie, reste à expliquer le délai. Dans le *Traité du ciel*, Aristote parle de l'orage et décrit ainsi cette anomalie apparente<sup>176</sup> :

L'éclair survient avant le tonnerre, bien qu'il ne prenne naissance qu'après, parce que l'audible est par nature d'une marche plus lente que le visible : ce dernier est perçu à distance, tandis que le premier ne l'est qu'au moment où il atteint l'ouïe. Mais c'est surtout parce que l'un, je veux dire l'élément igné, est ce qu'il y a de plus rapide de tout, tandis que l'autre, étant de nature de l'air, est moins rapide, n'arrivant à l'oreille qu'au moment où il la frappe.

Aristote revient ici sur le sujet qui lui pose tant de problèmes à propos de la propagation du son. La lumière est perçue à distance, sans déplacement, donc sans durée. Si le son n'est perçu qu'au moment où il frappe l'oreille, ce n'est pas parce qu'il y a mouvement local, ce qui impliquerait transport de matière, mais seulement parce que c'est de la nature de l'air d'être plus lente que celle du feu. La 'rapidité' dont il est fait mention ici correspond à la promptitude, ou à l'immédiateté, caractéristique de la simultanéité ou du délai, qu'on peut opposer à la vélocité qui est une mesure du temps en relation avec la distance. Le vocabulaire ancien concernant le mouvement est très approximatif, et on a souvent utilisé dans les traductions les termes 'rapidité', 'vitesse', voire même 'fréquence' d'une façon sans doute littéraire, mais peu scientifique.

On trouve chez Sénèque, adepte de la théorie continuiste de l'air défendue par les stoïciens, une version déjà dégradée de l'explication aristotélicienne :

On voit l'éclair avant d'entendre le son, parce que le sens de la vue, plus prompt, devance de beaucoup celui de l'ouïe.

Peu à peu on assiste à un report systématique de la constatation du phénomène physique du délai entre lumière et son vers une différence de qualité de perception. La propagation du son et sa durée ne trouve pas sa place dans un système qui ne prévoit pas de mouvement local sans transport de matière. C'est le problème central de la conception aristotélicienne du son. S'il y a délai, ce ne peut être que la conséquence d'une perception dégradée.

La constatation d'Aristote sur le délai entre tonnerre et éclair, attribuée à la différence de nature du milieu se transforme au cours du temps, et on trouve, dans les traités encyclopédiques du Moyen Âge, cette formulation, à propos du délai entre le coup porté et le son perçu<sup>177</sup> :

<sup>176</sup> Aristote, *Traité du ciel*, trad. J. Tricot, Paris, Vrin, 1986, II, 10, p. 189.

<sup>177</sup> Problèmes d'Aristote et autres filozophes et medecins selon la composition du corps humain avec ceux de Marc Antoine Zimara, item les solutions d'Alexandre Aphrodisee, sus plusieurs questions physiques, trad. de Georges de La Bouthière, Lyon, Ian de Tournes, 1554, p. 203. Texte complet du problème :

'Pourquoy quand au loin on frappe sur quelque bois, ou quelque autre corps solide, void on soudain donner le coup, et oyt on plus tard le son d'icelui, combien que le coup et le son se font tout en un instant ?'

'Pource que nous avons le sens de la veue beaucoup plus agu et plus sutil que celui de l'ouïe, et pour autant il anticipe : et l'ouïe comme le sens le plus grossier reçoit plus tard le son du coup donné. Par la mesme raison il est facile de souldre pourquoy en celle concution des nues, d'où procede ce coup espouvantable que nous

[...] Car le sens visual, comme le plus subtil previent et désavance le sens de l'ouïr qui est plus grossier, et par conséquent plus lent et tardif.

Faute d'une investigation approfondie, l'explication d'Aristote est vidée de son sens, il n'est plus question ici de la nature de l'air ou du feu, qui laissait encore une possibilité d'interprétation physique des deux types de propagation, nous sommes ici en pleine confusion, il s'agit seulement d'un manque de finesse, ou de subtilité, de l'audition sur la vue. On trouve la même analyse du tonnerre et de l'éclair, ainsi que des différences entre les sens, inspirée d'Aristote à travers Isidore de Séville, chez Barthélémy l'Anglais dans son encyclopédie *'Des propriétés des choses'*, écrit vers 1240<sup>178</sup> :

[...] Le sens de la vue est le plus subtil car il est de nature de feu; et après le sens de oïr qui vient de la nature de l'air, après vient le sens de odourer qui est de la nature de l'eau et après vient la nature de toucher qui est le plus gros car il est de la nature de la terre.

Cette interprétation dégradée du *Traité de l'Ame* d'Aristote se propage pendant tout le Moyen Âge et trouve son creuset dans la science chrétienne, jusqu'à imposer cette hiérarchie des sensations dans le dogme. Le délai entre la vue et l'ouïe est alors attribué à une différence de subtilité, on n'y reviendra plus avant longtemps.

## L'écho

On retrouve la même perplexité des savants de l'Antiquité à propos de l'écho. L'écho est sans doute le phénomène sonore le plus décrit dans la littérature. Homère en parle dans son oeuvre<sup>179</sup>, et le nom même est associé à la légende de la nymphe Echo et de Narcisse. Le mythe d'Echo semble assez tardif, on le rencontre dans le prologue d'Andromède d'Euripide, mais c'est Ovide qui raconte sa légende<sup>180</sup>. Amoureuse de Pan qui la dédaigne, puis elle-même aimée de Narcisse qu'elle éconduit, la nymphe se perd dans la forêt et répète sans cesse les fins de phrases, suite à une condamnation de Junon qui se venge d'une suspicion de complicité dans les infidélités de Jupiter. Comme on le voit, il s'agit sans aucun doute d'affaires très importantes.. Mais curieusement, alors que les auteurs lyriques de l'Antiquité décrivent volontiers le phénomène, les savants en parlent très peu, même lorsqu'ils traitent de la nature du son. Dans les textes qui nous sont parvenus, seul Aristote évoque l'écho, en quelques lignes, dans le passage du traité de l'âme consacré à l'audition :

L'écho se produit quand l'air, maintenu en une seule masse par une cavité qui le limite et l'empêche de se disperser, renvoie l'air comme une balle.

Ici Aristote parle de l'écho et de la réverbération, ce qui en effet correspond à deux manifestations d'un même phénomène, la réflexion et le retard, mais l'utilisation de la formule 'une cavité qui le limite', semble évoquer plutôt la réverbération qui se produit dans un local fermé. Les traducteurs utilisent pourtant tous le terme 'écho'. La suite du passage confirme cette analyse :

Il semble que l'écho se produit toujours, mais qu'il n'est pas toujours distinct, car il se passe pour le son ce qui se passe pour la lumière: en effet, la lumière est toujours réfléchi (sinon la lumière ne se diffuserait pas partout, mais l'obscurité régnerait en dehors des lieux éclairés par le Soleil), mais elle n'est pas toujours réfléchi d'une façon aussi parfaite que par l'eau, l'airain ou tout autre corps poli, de manière à produire dans tous les cas une ombre, caractère par lequel nous définissons communément la lumière.

Et en effet, l'intéressante analogie avec la diffusion de la lumière met en évidence la propriété du son de se réfléchir sur les corps, pas toujours de façon distincte, ce qui permet un renforcement de l'impression auditive. Le fait qu'Aristote précise que ces réflexions ne sont pas toujours perçues permet de penser qu'il considère ces réverbérations comme identiques à l'écho proprement dit. On aurait aimé cependant qu'il détaillât un peu plus le phénomène, au lieu de se disperser dans des digressions à propos de la diffusion lumineuse, sujet qu'il avait déjà traité dans le chapitre précédent.

On sait que pour Aristote, les mouvements à l'origine du son se communiquent à l'air contigu qui propage ce mouvement à l'organe de l'ouïe. La nécessité d'une masse d'air unique, qui l'empêche de se disperser est plusieurs fois affirmée dans le chapitre, ce qui laisse entendre que la propagation est instantanée, sujet sur lequel Aristote est très peu prolixe, on l'a vu. Le phénomène de l'écho est le révélateur d'un problème qui ne

---

appelons tonnerre, et ce feu qu'on nomme éclair, nous voyons beaucoup plus tôt ledit feu et éclair que nous n'entendons le coup et retentissement du tonnerre, combien que tel son esclatissant precede l'esclair, ou pour le moins sont causez l'un quand et l'autre. Car le sens visual, comme le plus subtil previent et désavance le sens de l'ouïr qui est plus grossier, et par conséquent plus lent et tardif.'

<sup>178</sup> Barthélemy l'Anglais, *Des propriétés des choses*, Paris, 1485, III, De l'âme raisonnable, p. 54.

<sup>179</sup> Homère, *Illiade*, XVII, 263 et XXI, 9 et *Odyssée*, XII, 240, in René Taton, *La science antique et médiévale*, Paris, PUF, 1957, p. 209.

<sup>180</sup> Ovide, *Les métamorphoses*, III, 336-510.



trouvera pas sa solution chez les aristotéliens, celui du temps de propagation du son. On a vu que l'autre manifestation de ce problème, le délai entre la vue d'un choc distant et la perception du son, était attribuée par les aristotéliens à une moindre sensibilité de l'ouïe sur la vue. Il est révélateur que les deux autres traités aristotéliens sur le son, le *De audibilibus*, et la section XI des *Problemata* qui traite de la voix et du son, n'évoquent à aucun moment l'explication de l'écho. Bien plus tard, le sujet sera développé et on introduira alors la notion de temps de propagation, et donc celle de vitesse.

Alexandre d'Aphrodise (III<sup>ème</sup> siècle), qui commente Aristote, notamment le *De anima*, fait preuve d'une certaine audace en dépassant et en contredisant le maître à ce sujet<sup>181</sup>. Il suggère que dans le phénomène de l'écho, et donc dans la propagation du son en général, l'air frappé par la source sonore, tout en restant continu et indivisible, communique une forme à l'air contigu, et propage cette forme jusqu'à son rebondissement sur un corps solide, renvoyant alors la forme en sens inverse. Le texte est prudent, et Alexandre est bien conscient de transgresser le principe d'absence de mouvement du son. Alan Towey, dans un article qui fait l'étude comparée des théories du son d'Aristote et d'Alexandre, montre bien le net progrès que constitue cette notion de 'transmission de forme'.<sup>182</sup>

Alexandre d'Aphrodise avait repris un grand nombre des *Problèmes* d'Aristote pour les commenter, et on en retrouve des éditions jusqu'à la fin de la Renaissance, avec sans doute quelques modifications pratiquées par les copistes et les éditeurs. C'est ainsi que l'écho est traité de cette façon dans une édition de 1554<sup>183</sup>:

'Pourquoy resonnent et rendent cris les lieux profonds et les caves ?'

'Ces lieux, par la reflexion en renvoyant le coup, rendent le son: car la voix frappe l'air et l'air le lieu, lequel de tant plus il est frappé, de tant rend il plus grand son. Mais les lieux humides, qui donnent lieu au coup et le resoudent, ne rendent point le son : mais selon la qualité et quantité du coup, se forme et exprime la qualité et quantité du son, qui se nomme Echo. Aucuns, non à bon droit, l'ont dit estre une deesse, et que le dieu Pan fut amoureux d'elle, ce qui n'est point vray. Car il y ha eu un homme sage et prudent, qui ha desiré de savoir, et charché d'entendre la cause de cette voix, et tant fut apres, et print si grand sollicitude, qu'il parvint à connoissance et solution de ce qu'il cherchoit. Ainsi comme Endymion, qui premier trouva les cours de la lune, en veillant la nuict, en sorte que tant veilla, qu'il faisoit son dormir de jour pour veiller toute la nuict et parvenir à la connoissance de ces mouvemens et cours.[..]'

Comme souvent, les encyclopédistes du Moyen Âge, même inspirés par les Anciens, lorsqu'ils sont confrontés à des difficultés, font des digressions qui permettent d'étourdir le lecteur et d'éviter le problème... L'explication de l'écho est un peu confuse, on retiendra que 'la voix frappe l'air et l'air le lieu', et que la qualité (la forme) du son est analogue à celle du coup et conservée après l'écho sur les parois.

Thomas d'Aquin, on l'a vu, s'est approprié l'analogie avec les ronds dans l'eau pour expliquer la propagation des sons et sa durée. Lorsqu'il fait le commentaire du *De anima*, il développe le bref passage d'Aristote concernant l'écho en se référant à cette analogie<sup>184</sup>:

De même, doit-on comprendre, lors du choc sur des corps sonnants, l'air se meut en cercle, et le son se diffuse partout. Tout près, certes, les ronds sont plus petits, mais le mouvement plus fort : aussi le son est-il perçu comme plus fort. Mais au loin, les ronds s'agrandissent, le mouvement est plus faible, et le son s'entend plus obscurément. Enfin, tout disparaît. Si cependant, avant que ces espèces de ronds sonores disparaissent, il se fait sur un corps une réverbération de l'air ainsi mû qui porte le son, les ronds repartent en sens contraire et le son se fait ainsi entendre en sens opposé. C'est cela qu'on appelle l'écho.

Il est clair ici qu'on abandonne Aristote et son instantanéité de la propagation des sons. On ne sait pas encore bien ce qui se passe dans cette propagation, ni d'ailleurs ce qui se propage, mais l'analogie est efficace, et l'écho et le retard qu'il génère trouve leur explication.

Le phénomène de l'écho, qui nous semble si familier, est loin d'être expliqué par les Anciens. En effet il est au cœur de la problématique du mouvement du son, et révèle, par la présence d'un délai, la notion de vitesse.

<sup>181</sup> Alexandre d'Aphrodise, *Questiones naturales et morales, De anima*, Venise, 1549, p. 41.

<sup>182</sup> Alan Towey, 'Aristotle and Alexander on hearing and instantaneous change : A dilemma in Aristotle's account of hearing', in *The second sense, studies in hearing and musical judgement from antiquity to the seventeenth century*, Warburg Institute, Univ. of London, 1991, p. 14.

<sup>183</sup> Problèmes d'Aristote et autres filozophes et medecins selon la composition du corps humain avec ceux de Marc Antoine Zimara, item les solutions d'Alexandre Aphrodisee, sus plusieurs questions physiques, trad. de Georges de La Bouthière, Lyon, Ian de Tournes, 1554, chap. 133, p. 252.

<sup>184</sup> Thomas d'Aquin, *Commentaires au Traité de l'Ame*, trad. Y. Pelletier, Univ. Laval Quebec, 2000, livre II, leçon 16, p.115.

Mais s'il y a mouvement, il y a transport de quelque chose, or Aristote ne peut pas accepter cette hypothèse. Tant que le mouvement de propagation d'un phénomène sans transport de matière ne sera pas accepté et représenté, on ne pourra pas comprendre comment le son se propage. On a vu que ce concept se précise peu à peu, notamment grâce à l'analogie des ronds dans l'eau.

## Conclusion - L'état de la connaissance du son vers la Renaissance

A la fin de la période de l'antiquité classique, nous disposons de deux voies d'étude de l'acoustique, l'une plutôt musicale, l'autre plutôt physique. Ce qu'on appellera l'acoustique jusqu'au XIX<sup>ème</sup> siècle, est essentiellement musicale et concerne les intervalles, les gammes et donc s'intéresse plus particulièrement au paramètre physique de la fréquence. Elle se développera de façon autonome et constitue la théorie de l'harmonie. En revanche, la connaissance physique du son, très rudimentaire, n'évoluera pratiquement pas jusqu'à la Renaissance et elle peut se résumer ainsi : les sons sont provoqués par des chocs, donc par un premier mouvement, qui sont à l'origine de mouvements plus petits et en grand nombre. Il s'agit de chocs entre des corps durs, les corps sonores, ou avec de l'air comme dans la voix et les instruments à vent. Ces petits mouvements issus des chocs sont communiqués à l'air qui les propage peu à peu. La densité de ces petits mouvements est parfois appelée vitesse, mais ne correspond pas à la vitesse instantanée du mouvement. Lorsque ces mouvements sont nombreux le son est aigu, lorsqu'ils sont plus rares, le son est grave. L'intensité sonore est le résultat de l'ampleur de ces mouvements. Il semble, mais on ne le dit pas, que le timbre soit conservé par une certaine 'forme' de ces mouvements. Ce qu'on appelle 'vitesse du son' plus tard, et 'célérité' aujourd'hui, n'est jamais abordée. Le retard du son sur la lumière, ou sur la perception visuelle, est attribuée à une moindre sensibilité de l'ouïe par rapport à la vue. Le son se propage de façon circulaire, peut-être sphérique, et n'est pas arrêté par les obstacles, comme les ronds qui se forment à la surface de l'eau après qu'on y a jeté une pierre. Il se produit des réflexions du son, comme pour la lumière, ce sont les échos.

Ce qu'on ne sait pas, c'est principalement le problème de la conservation de l'information sonore malgré les perturbations rencontrées lors de la propagation. Tout ce qui concerne la vitesse des mouvements, et d'une façon générale tous les phénomènes abordés sous l'angle temporel est très confus et ne fait l'objet que de spéculations, à l'exclusion de toute expérience, notamment de mesure du temps. Il convient de dire ici que ce n'est pas par manque de moyen, les instruments étaient à disposition, mais c'est une question conceptuelle. Les phénomènes sont prioritairement envisagés comme évoluant dans l'espace, et très peu dans le temps. La pauvreté des théories du mouvement en est l'exemple révélateur, et l'étude des sons n'échappe pas à cette lacune.

Par ailleurs l'évolution des connaissances a été bloquée pendant de longs siècles en occident par les dogmes platonicien puis aristotélicien qui se sont succédés en contrariant toutes les tentatives de progrès. Au cours de cette période de piétinement intellectuel on voit néanmoins apparaître quelques lueurs, comme Al-Farabi, Grosseteste (dommage que Roger Bacon n'ait pas étudié les sons..), puis, en ce qui concerne l'appréhension du temps dans l'étude des phénomènes physiques, Oresme et Nicolas de Cues.

## 2ème partie

### **La physique des sons : Une science nouvelle**

## Introduction

La fin de la Renaissance est le cadre d'une Révolution Scientifique, qui se construit à la fois sur l'abandon des dogmes scolastiques enseignés dans les universités, et sur la lente élaboration d'une nouvelle méthode d'observation et de compréhension de la nature, la méthode expérimentale. Théorisée par Francis Bacon, inventée par Galilée et par Mersenne, la méthode expérimentale se fonde sur l'observation, la reproduction physique des phénomènes, l'élaboration d'une hypothèse et la vérification. A partir du XVII<sup>ème</sup> siècle, la connaissance du Monde n'est plus un ensemble de préceptes immuables, mais devient une construction permanente du savoir par les savants et par les philosophes, qui échangent et confrontent leurs hypothèses. Mersenne est un des artisans de cette communauté de savants qui formera bientôt le socle des différentes Académies des Sciences, la Royal Society à Londres, l'Academia del Cimento à Florence, l'Academia de Lincei à Rome, l'Académie Royale des Sciences à Paris, puis plus tard l'Académie des Sciences de Berlin et celle de Saint Petersburg. La publication des travaux des académiciens permet la communication et la confrontation fructueuse des observations, des expériences et des hypothèses.

Quelques savants commencent à s'intéresser à la propagation des sons et aux différents phénomènes qui lui sont associés. Ils observent d'abord, puis peu à peu tenteront de réaliser des expériences pour définir un modèle convenant aux propriétés physiques du son. En 1700 Joseph Sauveur utilise le terme 'acoustique', déjà employé par les Anglais et semble-t-il par les Allemands (*Acoustick*), à partir du verbe *akouein* (ακουειν) qui signifie 'écouter' en grec. Vers le milieu du XVIII<sup>ème</sup> siècle, l'Encyclopédie consacre un long article au son et à sa propagation. Il ne reste plus qu'à créer les outils mathématiques qui serviront à analyser ce type de mouvement dit vibratoire, travail réalisé par D'Alembert, Euler, Daniel Bernoulli et Lagrange à l'occasion de la polémique sur les cordes vibrantes, à partir de 1750.

### ***Les propriétés du son et leur observation***

On doit à Francis Bacon, à Marin Mersenne et dans une moindre mesure à Galilée, une description systématique des différentes propriétés de la propagation des sons, et plusieurs tentatives d'explication de ces phénomènes.

Tout d'abord le son semble être un mouvement, puisqu'il transporte une information d'un lieu dans un autre. Ce type de mouvement, mal appréhendé par les philosophes grecs et donc par les scolastiques, constitue l'essentiel des hypothèses développées.

Puis vient l'explication de la hauteur du son, elle-même largement traitée dans les nombreuses études sur l'harmonie et les intervalles. Néanmoins la hauteur n'est pas expliquée ou alors de façon inexacte et incompatible avec d'autres propriétés. Attribuer, par exemple, comme le faisaient les Anciens, une vitesse différente aux sons graves et aigus revient à dire que ces sons ne seraient pas perçus simultanément.

La propriété de réflexion sur les parois suggère assez bien un modèle mécanique ou optique. Cependant ce n'est qu'à partir du début du XVII<sup>ème</sup> siècle que l'écho fait l'objet d'études systématiques. On procède à un recensement et à des observations rigoureuses de nombreux phénomènes d'échos remarquables.

Par ailleurs on ne sait pas expliquer la superposition de plusieurs sons simultanés qui se propagent dans le même milieu sans se dégrader.

Une propriété est mystérieuse, il s'agit du timbre, ou 'couleur' du son, qui semble lié à la nature des corps sonores, et qui se transmet en s'altérant peu.

La vitesse du son, corollaire du temps de propagation, est quasiment ignorée des philosophes de l'Antiquité et du Moyen Âge qui attribuent le décalage entre vision et audition d'un même phénomène sonore à une moindre sensibilité de l'ouïe sur la vue. On doit à Mersenne la première proposition d'expérience de mesure de cette vitesse.

L'intensité sonore semble poser moins de problèmes, elle s'atténue avec la distance et les différentes hypothèses s'en accommodent. En revanche il est très difficile de l'évaluer, et sa 'mesure' est sujette à des différences d'appréciation importantes.

D'autres propriétés sont décrites et étudiées comme l'influence du jour et de la nuit, de la propagation ascendante ou descendante, de la présence d'obstacles et de la réverbération dans les locaux ou dans les corps creux.

La notion de vibration est indissociable de l'étude du son, c'est une intuition ancienne qu'on trouve déjà chez les disciples d'Aristote. Mais ce type de mouvement n'est pas encore étudié. Tout au plus dit-on que le corps sonore est soumis à un tremblement (*tremor*). Dès la fin de la Renaissance, la notion de nombre de vibrations fait son apparition. La hauteur de son n'est pas explicitement liée à la distance entre les ondes, cela fera l'objet d'un développement au début du XVIII<sup>ème</sup> siècle, en particulier chez Galilée.

## ***Les trois modélisations de la propagation des sons***

Au début du XVII<sup>ème</sup> siècle, on dispose de trois hypothèses de représentation de la propagation des sons, toutes héritées de la Science Grecque.

La cohabitation de trois modèles, (le 'mouvement' d'une masse d'air, la théorie corpusculaire et les ondes), qui se combinent d'ailleurs à plusieurs reprises, ne pose finalement pas de problèmes pendant longtemps puisque la propagation du son est loin d'être la préoccupation de nos savants jusqu'à la fin de la Renaissance.

Les contraintes qui font obstacle à un modèle exact apparaissent dans la cohabitation des propriétés du son qui semblent incompatibles. Aucune de ces trois hypothèses ne semble totalement compatible avec toutes les propriétés observées.

La première de ces hypothèses est héritée de l'atomisme de Démocrite, d'Epicure et de Lucrèce. C'est une théorie corpusculaire, qui décrit le son comme un mouvement de particules, dont la vitesse, le nombre et la forme correspondent à la hauteur, à l'intensité et au timbre. Cette théorie réapparaît au XVII<sup>ème</sup> siècle, avec Beeckman et Gassendi, mais elle est sous-jacente à beaucoup de théories, car elle évoque la relative violence de la perception sonore. On parle alors de 'coups' et de sons qui 'frappent' l'oreille. Cette théorie est peu à peu abandonnée, même si elle persiste ça et là encore au XVIII<sup>ème</sup> siècle.

La seconde est directement issue de l'aristotélisme. Il s'agit, dans sa première formulation, de la théorie du mouvement de masses d'air. Dans ce cas le 'mouvement' est qualitatif et sans durée, c'est-à-dire que le son est instantané, comme la lumière. Cette théorie trouve son prolongement dans une analogie entre propagation du son et celle de la lumière, à partir notamment d'observations concernant les propriétés de réflexion des 'rayons sonores'. Elle est soutenue, dans la première moitié du XVII<sup>ème</sup> siècle, par des savants jésuites, et trouvera quelques adeptes par la suite, jusqu'au milieu du XVIII<sup>ème</sup> siècle.

La troisième modélisation a bénéficié d'un certain succès puisqu'elle est à l'origine de la création du terme 'onde' et de ses dérivés. Il s'agit de l'analogie avec les ronds dans l'eau formés lorsqu'on y a jeté une pierre. Cette idée apparaît chez les stoïciens, puis on la retrouve dans des textes du début de notre ère avant qu'elle soit reprise par Thomas d'Aquin au XIII<sup>ème</sup> siècle. L'analogie représente assez bien la propagation des sons, la diffusion sous forme de cercles concentriques, la propriété de superposition sans altération, la réflexion sur les parois et l'atténuation d'intensité avec la distance. Cette théorie sera adoptée par les savants de la mouvance 'ondulatoire', à la suite de Huygens qui l'appliquait également à la propagation de la lumière. Elle sera approfondie et sérieusement amendée, mais constitue le socle de la modélisation moderne de la propagation du son.

Dès que les observations montrent que le son 'prend du temps' à se propager, la question de sa vitesse se pose. Elle est l'objet de nombreuses expériences de mesure et de tentatives de théorisation, notamment sur sa constance et des éléments qui contribuent à sa variabilité. La mesure de la vitesse du son est tributaire des techniques de mesure du temps qui se développent à partir de la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle.

Parallèlement à ces tentatives de représentation, se construit une physique de l'air qui sera déterminante dans l'élaboration d'hypothèses sur la propagation du son.

Les applications techniques des connaissances en acoustique quittent peu à peu le domaine strictement musical et leurs métiers où la transmission des savoirs est traditionnellement orale et empirique plus qu'écrite et théorisée. On trouve quelques tentatives en architecture et vers 1670 un objet qui fera l'objet de toutes les attentions des savants pendant plus d'un siècle, afin d'en trouver les règles de fonctionnement optimal, il s'agit du porte-voix. Il s'agit sans doute ici d'une rare invention issue du monde savant, sans traditions et fondée sur la théorie. On verra la difficulté d'une telle entreprise.

Avec l'apparition d'outils mathématiques permettant d'étudier les variations des phénomènes dans le temps, on dispose, vers le milieu du XVIII<sup>ème</sup> siècle, d'une nouvelle approche théorique des mouvements vibratoires. Les équations aux dérivées partielles de Jean D'Alembert, appliquées aux mouvements d'une corde en vibration puis grâce à Daniel Bernoulli aux mouvements d'air dans les tubes, constituent alors le fondement théorique de l'étude de la propagation des ondes. Au XIX<sup>ème</sup> siècle on est alors en mesure de construire une représentation analogique, et graphique, du phénomène sonore qui est encore en usage à la fin du XX<sup>ème</sup> siècle.

## 1 - L'essence du son

En Occident, jusqu'au XVI<sup>ème</sup> siècle, l'essentiel de la connaissance scientifique provenait du corpus aristotélicien, adapté et adopté par l'Eglise qui en faisait un système d'explication des phénomènes naturels compatible avec les Ecritures. Il s'agissait d'un savoir dogmatique, enseigné et transmis sans contestation dans les écoles et les universités. L'expérimentation était une pratique marginale, et n'intervenait que peu dans l'évolution de la connaissance. Les savoirs étaient organisés selon une classification devenue immuable, établie par Cassiodore et Boèce vers le VI<sup>ème</sup> siècle. De nombreux ouvrages de type encyclopédiques circulent à partir du XII<sup>ème</sup> siècle et seront par la suite édités à la faveur de la naissance de l'imprimerie à partir de 1460. A la fin de la Renaissance, quelques savants se risquent à proposer des hypothèses alternatives, notamment en Astronomie et en Mathématiques. Ce qu'on nommera 'Philosophie Naturelle', démarche de description et d'explication des phénomènes naturels, commence à se construire vers le début du XVII<sup>ème</sup> siècle avec l'apport de la méthode expérimentale théorisée notamment par Francis Bacon et Galilée.

### **La physique des sons chez les Scolastiques**

La science scolastique se fonde principalement sur les écrits des Anciens, et surtout de l'œuvre d'Aristote qui fait l'objet de multiples traductions et de commentaires tout au long du Moyen Âge. En ce qui concerne la physique des sons, trois textes attribués à Aristote, forment l'essentiel du corpus. Il s'agit d'abord du chapitre 8, livre II du *Traité de l'âme* qui traite du son à partir de l'étude de la perception. Le second texte est le *De audibilibus*. Ce court traité est très certainement un extrait d'un ouvrage plus important et nous a été transmis par Porphyre qui en attribuait la paternité à Aristote. On sait, depuis le XIX<sup>ème</sup> siècle, qu'il ne peut pas être du Stagirite, mais qu'il a sans doute été écrit par un de ses disciples, Straton. On citera également les *Problemata* ou *Problèmes d'Aristote*, recueil de questions sur des sujets divers dont il existe de nombreuses traductions et adaptations diffusées pendant tout le Moyen Âge, et dont la section XI est consacrée à la voix et aux sons. Ce dernier texte n'est pas non plus d'Aristote, mais semble-t-il de plusieurs auteurs de l'école. Les *Problemata* traitent de questions diverses et parfois anecdotiques. En revanche les deux autres textes énoncent les bases de deux théories du son assez différentes.

### **Le mouvement de la masse d'air « *unus et continuus* »**

C'est la théorie d'Aristote, développée au chapitre 8 du livre II du *Traité de l'âme*, modifiée par Thomas d'Aquin qui la rend compatible avec la théorie des 'ronds dans l'eau' qu'il emprunte aux stoïciens et à Averroès. La principale difficulté de cette représentation c'est l'existence et la nature du mouvement qui accompagne la propagation du son.

Aristote bute sur ce problème car les catégories de mouvement (*kinesis*) qu'il a définies ne peuvent pas convenir aux mouvements vibratoires. En effet ces mouvements véhiculent une perturbation du milieu et Aristote n'a pas prévu de catégorie pour ces mouvements sans transport de matière. Aristote utilise le terme '*kinesis*', souvent traduit par mouvement, mais qui pour lui signifie plutôt une altération ou un changement, et qui se décline selon quatre catégories :

- Le changement de substance, génération et corruption.
- Le changement quantitatif, accroissement et réduction.
- Le changement qualitatif ou '*alloiosis*', concept assez large qui regroupe un grand nombre de types d'altérations.
- le changement de lieu ou mouvement local, avec transport de matière. C'est le mouvement dans son sens commun.

Les trois premiers sont des mouvements sans durée, ce qui ne veut pas dire qu'il n'y ait pas d'intervalle de temps entre le premier et le dernier état, mais que le processus comprend éventuellement des étapes. Le mouvement local, quant à lui, prend un certain temps et donc on peut lui attribuer une vitesse. Pour la propagation du son, Aristote hésite entre *alloiosis* et mouvement local<sup>185</sup>. Le mouvement local suppose un transport de matière qu'Aristote n'envisage pas. Cependant l'*alloiosis* se définit comme un changement sans durée. Le choix d'Aristote, développé dans le *Traité de l'âme*, est le changement de qualité ou '*alloiosis*'. La conséquence importante est que le son n'est pas un mouvement, il est donc instantané et son processus comprend deux états qui peuvent être très fugitifs, la génération, par le choc sonore, et la perception, par l'ouïe.

<sup>185</sup> Voir Aristote, *De sensu et sensibili*, II, 6 et *De anima*, II, 8. Voir Partie I, chap. 4.

Aristote revient sur ce problème qu'il ne résout pas dans le *De sensu et sensibili*, qu'on croirait écrit par un autre, tellement les idées développées sont en contradiction avec celles du *De anima*. C'est ainsi qu'on y lit<sup>186</sup> :

Mais en supposant même que la sensation du son que l'on entend, se confonde toujours dans un même temps avec la sensation du son qu'on vient d'entendre; ou d'une manière générale, en supposant que la sensation présente se confonde dans un même temps avec la sensation antérieure, et qu'il n'y ait point ici de génération successive des sensations, mais qu'elles soient sans avoir le temps de devenir, le phénomène existe néanmoins de la façon qu'existe le son qui, après que le coup a été frappé, n'est pas encore parvenu à l'ouïe.

On est surpris de la thèse défendue ici, et qui n'est pas reprise par les Scolastiques qui, eux, défendent clairement l'idée que le son n'a pas d'existence en dehors de sa génération et de sa réception.

Plus loin on revient à des idées plus 'aristotéliennes' :

Mais le son et l'odeur ne sont pas des corps : ce n'est qu'une affection des corps et une certaine espèce de mouvement; car autrement, ces phénomènes ne se produiraient pas. D'un autre côté, il est vrai que le son et l'odeur ne peuvent point être non plus sans les corps.

Mais la conclusion est troublante :

Il est donc tout simple que pour les sens qui ont besoin d'un intermédiaire, les sensations éprouvées n'aient pas lieu en même temps, si ce n'est pour la lumière [...]

Quoi qu'il en soit, les thèses défendues ici n'ont pas été reprises par les Scolastiques en ce qui concerne le son, puisque leur théorie du son affirme bien que le seul mouvement qui y est associé est le mouvement local des corps sonores au moment du choc générateur.

Plus tard, les Scolastiques tardifs contourneront la difficulté en attribuant au son un mouvement particulier, selon la qualité ou 'qualitatif', d'une masse d'air continue, entre le corps sonore et l'oreille. On dit alors que le son est une 'qualité successive' (*qualitas successiva*) qui, semble-t-il, possède certains attributs du mouvement, comme la durée et donc la vitesse. En effet, il est difficile de croire que le temps de propagation n'ait pas été observé, même si, à la suite d'Aristote, on explique le délai par une moindre vivacité de l'ouïe par rapport à la vue.

La théorie des masses d'air continues explique mal la superposition, la réflexion et la hauteur du son, et ignore le temps de propagation. Le timbre est défini par les caractéristiques du corps sonore et du choc générateur du son, sans que l'on sache à quelle altération de l'air il correspond.

## Les chocs successifs de parties d'air contiguës

Parmi disciples d'Aristote, Straton, dans le *De audibilibus* longtemps attribué au maître, est plus convaincant en proposant une succession de petits chocs semblables affectant plusieurs masses d'air contiguës<sup>187</sup> :

800a : Quando enim consequentem aerem percusserit spiritus incidens ipsi, aer jam fertur vi, proximum sibi impellens similiter, ita ut undique vocem extendat eandem, in quantum accidit fieri aeris motum.

[En effet, quand la partie d'air qui suit immédiatement est frappée par cet air même qui arrive, elle est alors déportée par la force du coup, et elle ébranle de la même façon celle qui lui est la plus proche, de façon à ce qu'elle étende de tous côtés la même voix, tant que le mouvement de l'air se fait.]

En proposant cette succession de chocs de parties d'air conjointes, le *De audibilibus* suggère une solution au problème du mouvement, mais ne résout pas les autres tels que la transmission de l'information de hauteur et de timbre. Rappelons que l'énonciation de cette hypothèse ne constitue en rien la prétendue découverte du mouvement vibratoire par Aristote qui repose sur une interprétation anachronique du texte par plusieurs auteurs du XIX<sup>e</sup> siècle<sup>188</sup>.

<sup>186</sup> Aristote, *De sensu et sensibili*, trad. Jules Barthelemy Saint Hilaire, Ladrangé, Paris, 1866, chapitre VI, paragraphe 10.

<sup>187</sup> Ps Aristote, *De audibilibus*, trad. Francisco Patricio in *Aristotelis opera omnia*, dans l'édition Bekker, Berlin, 1831, t III, *Aristoteles latine interpretibus variis*, p. 388-391.

<sup>188</sup> Voir Partie I, chap. 3, la discussion et les commentaires concernant l'article de Thomas Young sur le *De audibilibus*.



Toutefois, cette hypothèse, par son réalisme et sa pertinence, va longtemps perdurer en particulier chez les cartésiens. Elle est également adoptée par les savants arabes qui l'approfondissent en évoquant une autre analogie, celle des 'perles' de son qui jaillissent après leur compression<sup>189</sup>.

Le traité *De audibilibus* de Straton est sans aucun doute incomplet dans la version qui nous est parvenue. En effet, l'auteur s'attarde sur de nombreux problèmes liés aux sons, la génération et la propagation, les organes de la voix, la respiration, les instruments à vent et à cordes, etc. Il semble improbable qu'il n'ait pas, par exemple, abordé et étudié l'écho. Les thèses originales qui sont développées dans ce texte ont-elles été reprises par d'autres auteurs qui avaient accès à la version complète ? Il serait intéressant d'étudier les raisons de ces coupes dans un texte attribué à Aristote mais qui adopte des positions tellement improbables qu'elles ne pouvaient pas être acceptées comme telles par les Scolastiques. Par ailleurs, ce texte rarement étudié n'est pas d'Aristote, tous les traducteurs récents en conviennent. Il ne figure d'ailleurs pas sur la liste exhaustive que Diogène Laërce nous donne des œuvres d'Aristote, ce qui n'est pas une preuve, mais un indice. On doit à Porphyre, dans son commentaire aux Harmoniques de Ptolémée, l'attribution de ce texte à Aristote. Les Scolastiques ont ensuite relayé cette information<sup>190</sup>.

## **La physique des sons chez les arabes au Xème siècle**

Plus tard, du Xème au XIIème siècle, une autre tradition, arabo-islamique, se développe notamment en Andalousie, avec des traductions du grec en arabe, en hébreu, puis en latin, des œuvres d'Aristote avec des Commentaires notamment d'Averroès. Les commentaires d'Averroès seront critiqués par Thomas d'Aquin, et condamnés par l'Université de Paris en 1240, puis par l'Eglise au concile de Latran en 1512.

Si plusieurs auteurs de cette tradition arabo-musulmane ont écrit sur la musique, peu ont parlé explicitement de la nature physique du son. Il s'agit notamment d'Al-Farabi, d'Averroès (Ibn Rushd) et d'Avicenne (Ibn Sina).

### **Al-Farabi**

Au Xème siècle, le savant arabe Al-Farabi, éminent commentateur d'Aristote, écrit un Grand livre de la musique (*Kitâb l-Mûsîqî al- Kabîr*)<sup>191</sup>. Au début de l'ouvrage il expose sa théorie de la production des sons et développe largement, en les complétant, les thèses aristotéliennes sur les chocs. Tout d'abord, Al-Farabi décrit les caractéristiques des corps non sonores, la 'laine' d'Aristote :

Certains corps, pressés par un autre, ne résistent pas à celui qui le presse, mais lui cèdent. Ce sont : les corps qui se replient sur eux-mêmes comme les pâtes molles; les corps fluides qui se laissent traverser; et les corps qui se déplacent dans la direction initiale de l'impulsion qui leur est donnée, sans opposer aucune résistance. Dans tous ces cas, le choc imprimé à ces corps ne produit aucun son.

Nous avons affaire ici à un discours un peu plus physique que celui d'Aristote. Puis Al-Farabi décrit les corps sonores :

Dans d'autres cas, des corps heurtés par un autre résistent au choc, ne se replient pas sur eux-mêmes, ne se laissent pas traverser, ni ne se déplacent selon la direction du choc. C'est ce qui a lieu pour les corps durs, et d'une puissance supérieure à celle du corps qui les heurte. Il se peut alors que, lorsqu'ils sont choqués, ils produisent un son. Le choc est le contact d'un corps solide avec un autre sur lequel il exerce une poussée, résultant de son mouvement propre.

Le son est le résultat à la fois d'un choc et d'une résistance du corps heurté à ce choc. Al-Farabi poursuit :

Les corps dont nous disposons, pour se déplacer afin d'en rencontrer un autre, traversent toujours l'air, l'eau ou quelque autre milieu analogue, facile à rompre. Lorsqu'un corps se met en mouvement pour aller à la rencontre d'un autre, une partie de la couche d'air qui les sépare se laisse fendre et l'autre fuit devant son avance. Serrée entre le corps qui s'avance et celui vers lequel

<sup>189</sup> Voir Partie I, chap. 3, La physique des sons chez les arabes au Xème siècle, Al Farabi, ainsi qu'Averroès dans le commentaire au Traité de l'âme.

<sup>190</sup> On l'attribue généralement à Straton de Lampsaque. Certains disent que c'est Théophraste, pour Karl von Jan, il s'agit d'Héraclide du Pont. Voir à ce sujet : Gottschalk, H.B., « The De Audibilibus and peripatetic Acoustics », in Hermes, 96 (1968), p 435-461. Un consensus semble se former autour de Straton (Diels, Düring, Capelle et les traducteurs de l'édition anglaise d'Oxford).

<sup>191</sup> Al-Farabi, *Grand Traité de la Musique / Kitâbu l-Mûsîqî al- Kabîr*, Rodolphe d'Erlanger, 1872-1932 (Traducteur), Paris, P. Geuthner, 1930, Institut du Monde Arabe, 2001, tome 1, p 79-81.

il se dirige, cette portion d'air se comprime, puis s'échappe en rebondissant comme le ferait une perle que l'on presse entre deux doigts.

Lorsque les molécules de la couche d'air qui s'échappe sous la pression exercée dans le choc de deux corps, sont fortement comprimées et jointes entre elles, il se produit un son. Le son se produit d'autant mieux et est d'autant plus net que cette compression est plus forte.

Plus les deux corps qui s'entrechoquent sont polis, plus la cohésion de leurs molécules est grande, plus l'air rebondit avec force. C'est le cas du cuivre et du fer. Plus la surface, au contraire, est rugueuse, plus les molécules sont lâches, moins la production du son est probable. Il est difficile, en effet, à la laine et aux éponges de produire un son.

Nous retrouvons ici l'airain et la laine chers à Aristote, mais c'est pour une explication plus précise. Ici l'air intervient, comprimé puis échappé brusquement, avec un rebondissement favorisé par la cohésion et la densité des molécules. Al-Farabi évoque même le cas où c'est l'air qui est frappé, ou l'eau :

L'air, en lui-même, peut, d'autre part, produire un son, quand, par exemple, il est frappé par un fouet. La portion de l'air que le fouet a heurtée résiste au choc, ne se déchire pas. Ses molécules se resserrent et se comportent comme celles du cuivre ou d'autres corps de même espèce. Il en va de même de l'eau: quand elle résiste au choc qui lui est imprimé, il se produit un son; il ne s'en produit aucun quand elle se fend sans résistance.

Al Farabi explique également les sons produits de façon continue, les notes :

Lorsqu'un choc est imprimé par un corps à un autre, l'air ambiant est choqué; refoulé, il glisse et tournoie sur la surface polie du corps heurté en produisant une note.

Nous sommes ici environ treize siècles après Aristote, mais, alors qu'en occident les théories du Stagirite vont bientôt constituer le dogme enseigné, avec ses imprécisions et son immuabilité, nous assistons ici à une construction, sur la base des mêmes théories, d'un savoir bien plus approfondi par l'expérience et par l'observation. Pour Al-Farabi la percussion s'accompagne d'une pression d'un corps sur l'autre. Cette pression provoque une sorte d'explosion, ou décompression, qui libère l'air contenu et frappe l'air environnant. On passe lentement de l'idée de choc à celle d'une compression, qui se communique au milieu. Cependant le phénomène n'est pas explicitement vibratoire et on est encore loin de l'explication physique. Ce texte n'en est pas moins audacieux par le dépassement du dogme aristotélicien.

## Avicenne, Ibn Sina

Ibn Sina, que les occidentaux appellent Avicenne est sans conteste l'un des plus grands savants arabomusulmans. Né près de Boukhara en 980, mort en 1037 à Hamadan, c'est en Persan qu'il écrit ses nombreux livres, de philosophie, de médecine, de mathématiques et de physique. Le *Livre des sciences*, ou *Danesh-nama*, est un recueil de textes sur les sciences en général, médecine, astronomie, physique et mathématiques, et plutôt destiné à un public éclairé mais non spécialiste<sup>192</sup>. Ibn Sina y expose un abrégé de ses théories musicales développées plus largement dans son ouvrage technique sur la musique, le *Kitab al-shifa*.

Ibn-Sina décrit le son dans un court passage du *Livre des Sciences*, à l'occasion de l'étude de l'ouïe<sup>193</sup> :

L'audition consiste à percevoir le son. Celui-ci provient des ondulations de l'air par suite d'une secousse rude et subite qui lui survient de telle sorte que, d'entre deux corps qui se heurtent, l'ondulation [de l'air] s'élance d'un élan puissant et rapide ; ou bien l'air surgit à l'intérieur d'un corps qu'il traverse d'un mouvement très rapide, de sorte que l'ondulation intervient – ondulation qui s'épanche largement et à grande vitesse. Lorsqu'elle atteint l'oreille, l'air qui se trouve à l'intérieur de l'oreille subit de même l'ondulation par la cavité qui y fut créée ; et cette ondulation éveille le nerf auditif.

La description est intéressante mais on est tributaire du terme 'ondulation' qui est semble-t-il un anachronisme. Sans accès au texte original arabe, on peut toutefois penser qu'il s'agit plus généralement d'une 'perturbation de l'air'. L'origine du son est un choc, soit de deux corps, soit de l'air sur un corps creux, et

<sup>192</sup> L'édition de Mohammad Achena et Hanri Massé, sous l'égide de l'Unesco et de l'association Guillaume Budé (Ed. Les belles lettres, Paris, 1958) constitue la traduction de référence en Français. De nombreuses copies du manuscrit (British Museum, Bibliothèque du Madjlis à Téhéran, Université de Meshed, Bibliothèque d'Istanbul, et surtout le manuscrit du *Chefa* n° 331 de la Bibliothèque du Caire) ont permis une traduction critique, mais rendue complexe du fait de copies en persan, en arabe et de modifications effectuées par les copistes eux-mêmes. La dernière partie du texte, sur la musique, a été traduite en allemand par Mahmoud el-Hefny en 1931.

<sup>193</sup> Avicenne, Ibn Sina, *Le livre des sciences*, trad. M. Achena et H. Massé, Paris, Les Belles Lettres, 1958, tome 2, p 57-58.

provoque une émission violente d'air sous une forme, définie ici par le terme 'ondulation', qui se propage jusqu'à l'oreille en imprimant à l'air interne une forme analogue. On retrouve la théorie aristotélicienne, avec cette entité imprécise qui semble être cependant une sorte de perturbation de l'air. On est alors assez proche de la théorie physique, puisqu'il existe bien un mouvement de propagation d'une perturbation de l'air. Par ailleurs, Avicenne distingue très nettement d'une part le mouvement de l'air (très rapide) et d'autre part le mouvement de l'ondulation (à grande vitesse). Il semble que ce soit le mouvement de l'air qui provoque celui de la perturbation. Mais ce passage est trop peu développé pour qu'on puisse en retirer une théorie construite.

En revanche, Avicenne, dans un autre ouvrage, le *De anima* qui constitue le sixième livre de son ouvrage de physique, les *Libri naturales*<sup>194</sup>, admet franchement le mouvement du son. Ibn Sina adopte une position originale. Pour établir le mouvement du son, il note le caractère non stabilisé de l'essence du son : « *Dicemus igitur quod sonus non est aliquid stabilis essentiae nec habet fixum esse* ». Par ailleurs il définit l'essence du son comme un accident qui provient d'une collision ou d'une scission : « *Manifestum est autem quod sonum quiddam est quod accidit, sed non accidit nisi ex scissione vel ex percussione*. » Enfin il affirme que le son met en jeu deux sortes de mouvements, l'un qui précède la percussion, et l'autre qui est un mouvement de l'air : « *Motus autem secundus est cessio aeris aut fuga et ejus constrictio inter illa* » (Mais le second mouvement est la cession [au sens de céder], ou la fuite de l'air et son resserrement entre eux [les corps percutés]).

---

<sup>194</sup> Ibn-Sina, Avicenne, *Libri naturales*, livre 6, partie II, chapitre 5, *Capitulum de sensu audiendi*.

## Le son dans le commentaire au *De anima* d'Averroès

Plusieurs traducteurs et éditeurs des œuvres d'Aristote ont ajouté des commentaires de Thomas d'Aquin ou d'Averroès aux textes originaux. C'est ainsi qu'on peut se faire une idée de la pensée averroïte sur de nombreux sujets, et ici, à partir du commentaire au *Traité de l'âme*, dans le chapitre 8 du livre II <sup>195</sup>:

Extrait 1, édition Sophianos, 1562:

Et intendit per aliquid, percussens & apud aliquid, percussum: & per aliquo medium, s. aerem & aquam. & quod dicit in hoc capitulo, manifestum est. Et abbreviatio eius est quod sonus fit a percussente, & a percusso, ab aliquo, in quo percussio cadit. Percussio enim est actio: ergo habet genus & percussentem, & materiam, s. percussum. Et, quia percussio est motus localis, non fit nisi in aqua & aere, quoniam impossibile est ut sit in vacuo: declaratum est in sermonibus universalibus. Percussum autem, ex quo sonus, est duobus modis, aut tunc durum, sicut cuprum, aut concavum. Sonus igitur fit a leni propter expulsionem aeris apud percussione a partibus eius equaliter: & hoc intendebat cum dixit, quia est de sono in hac intentione, sicut de reflectione radiorum. Quia tunc apparet in corporibus duris, quia equaliter existit in eis, quia per congregatur in eis una actio: ut homines, qui attrahunt ponderosa a corporibus duris concavis propter reflectionem aeris in eis frequenter quia non possunt eire aer ab eis: sic expellitur, sicut pila expellitur a pariete: & hoc intendebat per reflectionem. Et debet sciri quod sonus non fit in aere ita quod aer expellitur a percussente, movetur per se singuliter, donec perveniat ad audiri. Sed debet sciri quod illud, quod in

Extrait 2, édition Scotus, 1495 :

**¶ Et intendit per aliquid percussens: & apud aliquid percussum: & per in aliquo medium, s. aerem & aquam: & quod dicit in hoc capitulo manifestum est. & abbreviatio eius est quod sonus fit a percussente & a percusso: & ab aliquo in quo percussio cadit. Percussio enim est actio: ergo habet genus & percussentem & materiam, s. percussum. Et quia percussio est motus localis non fit nisi in aqua & aere. Quia impossibile est ut sit in vacuo: ut declaratum est in sermonibus universalibus: percussum autem, ex quo fit sonus, est duobus modis: aut tunc durum, sicut cuprum: aut concavum. Sonus igitur fit a leni propter expulsionem aeris apud percussione a partibus eius equaliter: & hoc intendebat cum dixit, quia est de sono in hac intentione, sicut de reflectione radiorum, s. quod fortiter apparet in corporibus duris quia equaliter existit in eis: quapropter congregatur in eis una actio: ut boves qui attrahunt ponderosa a corporibus aut tunc concavis propter reflectionem aeris in eis frequenter quia non possunt eire aer ab eis: & sic expellitur sicut pila expellitur a pariete: & hoc intendebat per reflectionem. Et debet sciri quod sonus non fit in aere ita quod aer expellitur a percussente movetur per se singuliter donec perveniat ad audiri. Sed debet sciri quod illud, quod in**

[Et intendit per aliquid percussens et apud aliquid percussum et per in aliquo medium, fit aerem et aquam. Et quod dicit in hoc capitulo, manifestum est et abbreviatio eius est quod sonus fit a percussente et a percusso. Et ab aliquo in quo percussio cadit. Percussio enim est actio, ergo habet

<sup>195</sup> (extrait 1) Aristote, *Aristotelis de anima libri tres cum Averrois commentariis* trad. Sophianos, Venise, 1562, p.91.

(extrait 2) *Opera Aristotelis ; cum Averrois commentaria* ; ed. Octavianus Scotus, Venise, 1495, p.306.

agens fit percutem et materiam. Et quia percussio est motus localis, non fit nisi in aqua et aere. Quam impossibile est ut fit in vacuo, ut declaratur in sermonibus universalibus. Percussum autem ex quo fit sonus est duobus modis : aut lene durum sicut cuprum, aut concavum. Sonus igitur fit a leni propter expulsionem aeris apud percussione a partibus ejus aequaliter. Et hoc intendebat cum dixit (cuprum autem quod est lene) : quia ita est de sono in hac intentione sicut de reflexione radiorum.

Si quod fortiter apparet in corporibus duris, quia aequaliter existit in eis qua propter congregatur in eis una actio ; ut homines qui attrahunt pondero fiunt (?) a corporibus autem concavis reflexionem aeris in eis frequentem quia non potest exire aer ab eis ; et fit expellitur sicut pila expellitur a pariete et hoc intendebat per reflexionem.

Et debes scire quod sonum non fit in aere ita quod aer qui expellitur a percutiente movetur per se singulariter donec perveniat ad auditum]

Et il [Aristote] affirme que cela se produit par quelque chose qui percute sur une chose percutée, et dans un certain milieu, l'air ou l'eau. Et ce qu'il dit dans ce chapitre est évident et se résume à ce que le son se produit entre un percutant et un percuté ; et par quelque chose sur quoi la percussion agit, car en effet la percussion est une action, donc il faut un agent, le percutant et il faut une matière. Et parce que la percussion est un mouvement local, elle ne se fait pas s'il n'y a pas d'air ni d'eau. Il est tout à fait impossible qu'elle se fasse dans le vide, comme on le dit dans les discours généraux. Mais, ce qui est percuté, d'où le son se produit, l'est selon deux modes : soit sur une chose dure et lisse, comme le cuivre, soit dans quelque chose de concave. Le son se produit donc par une chose lisse à cause de l'expulsion de l'air précisément au moment de la percussion par ses parties. Et c'est ce qu'il affirmait quand il disait (car le cuivre c'est ce qui est lisse) : car il en est du son, dans cette affirmation, comme de la réflexion des rayons.

Cela est particulièrement intense dans les corps durs, parce qu'il y a uniformément en eux ce à cause de quoi une unique action est rassemblée en eux. Comme les hommes qui tirent avec un poids, ils le sont (???) par les corps concaves à cause de la fréquente réflexion de l'air [qui a lieu] en eux, parce que l'air ne peut pas sortir d'eux. Il est expulsé comme la balle l'est du mur, ce qui voulait dire par réflexion.

Et on doit savoir que le son ne se produit pas dans l'air ainsi que l'air qui est expulsé par un [corps] percutant se meut par lui-même isolément jusqu'à ce qu'il parvienne à l'audition.

Texte d'Aristote :

La production du son est toujours la réaction d'une chose à une autre, dans un certain milieu. C'est pourquoi aussi, il est impossible que d'un unique objet provienne un son, car la distinction entre le corps frappant et le corps frappé a pour conséquence que ce qui résonne ne résonne que lorsqu'il est en rapport avec quelque chose. De plus, le choc n'a pas lieu sans un mouvement de translation.

Mais, comme nous l'avons dit ce n'est pas le choc de deux corps pris au hasard qui constitue le son. La laine, en effet, ne rend aucun son si on la frappe, au contraire de ce qui se passe pour l'airain et pour tous les corps lisses et creux : l'airain, c'est parce qu'il est lisse, tandis que les corps creux produisent, par répercussion, une série de chocs à la suite du premier, l'air qui a été mis en mouvement étant dans l'impossibilité de s'échapper.

La théorie des parties d'air, jamais énoncée ainsi mais constamment présente, afin de garder ce caractère un et continu de l'air, est indissociable de la théorie du mouvement d'air. En effet, ce mouvement ne peut pas être celui d'un air un et continu, ce serait le vent. Dès le *De audibilibus*, la distinction était faite et l'introduction d'un fractionnement de l'air en parties était énoncée. En outre, cette modélisation facilite l'explication de nombre de phénomènes, et en particulier celui de l'écho. Dès qu'on accepte le mouvement de chaque partie d'air, mouvement de tremblement ou de chocs successifs, on peut expliquer le processus de l'écho. Ce qui est remarquable chez Averroès, c'est la phrase :

Sonus igitur fit a leni propter expulsionem aeris apud percussione a partibus ejus aequaliter.

[Le son se produit donc par une chose lisse à cause de l'expulsion de l'air précisément au moment de la percussion par ses parties.]

En effet, Averroès parle ici d'expulsion de l'air au moment du choc, c'est-à-dire que le choc n'est pas seulement le résultat d'un mouvement local, mais qu'il est également générateur d'un mouvement de l'air qui lui est en quelque sorte analogue. C'est ici une avancée importante par rapport à Aristote, et même par rapport au *De audibilibus* qui n'est pas aussi déterminé dans cette affirmation du mouvement de l'air.

La comparaison entre le phénomène de réflexion du son et la respiration saccadée d'un homme qui fait un effort est très significative de l'approche sensorielle, presque sensuelle, des phénomènes physiques, même si Averroès se rattrape grâce à l'image plus froide de la balle qui rebondit.

On retrouve également cette représentation de l'air expulsé chez Al-Farabi. Le son est défini comme une compression de l'air entre les deux corps jusqu'à un certain jaillissement, le tout se produisant très rapidement. Cet air bouscule en quelque sorte l'air voisin et le son se propage. On voit qu'on est davantage dans l'Aristote fictif du *De audibilibus* que dans l'authentique, celui du *Traité de l'âme*, dont Averroès fait pourtant ici la paraphrase.

Averroès est en outre le promoteur de la représentation du son par les 'ronds dans l'eau' qui sera reprise par tous, et étudiée ici dans un autre chapitre.

Il est probable que d'autres savants arabo-musulmans aient étudié et écrit sur la nature physique du son. Encore une fois, il est difficile d'extraire quelques lignes d'ouvrages traitant soit de musique, soit d'anatomie, ou encore des facultés de perception. On peut néanmoins supposer que dans la grande quantité de textes qui ne nous sont pas parvenus, il existe de tels textes, et notamment de la part d'Ibn al Haytham. En effet celui-ci a écrit plusieurs ouvrages sur l'optique physique dont s'est inspiré, entre autres, Robert Grosseteste, lui-même auteur d'un court traité sur le son, *De generatione sonorum*, très original dans son approche de la physique des sons, différente de l'approche aristotélicienne. En l'absence de documents, on se limitera à des conjectures.

## **La physique des sons à la fin de la Renaissance**

La plupart des savants de ce début du XVII<sup>e</sup> siècle abordent l'étude des sons par la musique dont ils connaissent tous les bases théoriques. Elle fait partie de l'enseignement classique aux côtés de la géométrie, de l'arithmétique et de l'astronomie. Ce qui intéresse surtout nos savants à la fin de la Renaissance, c'est l'étude des intervalles et des consonances, et la place que doivent occuper les tierces et les sixtes dans l'échelle traditionnelle, dite pythagoricienne, basée uniquement sur les quintes et les quarts. La question est de trouver la partition idéale de l'octave qui permet de réaliser un compromis entre la justesse des notes et la réalisation d'instruments à notes fixes. Cette problématique est à l'origine de la gamme classique, celle de Zarlino, définie par des rapports numériques précis correspondant aux rapports de division du monocorde. Zarlino conçoit un système, le *senario*, fondé sur une suite de rapports identifiés aux premiers nombres entiers : 2/1 (octave), 3/2 (quinte), 4/3 (quarte), 5/4 (tierce majeure), 6/5 (tierce mineure). Un peu de mysticisme numérolgique, inspiré par une pensée néo-platonicienne, ne déplaisait pas à cette époque où l'on cherchait des justifications scientifiques, et notamment mathématiques, à une certaine harmonie de la nature. Kepler reprendra en 1619 cette approche, dans son *Harmonices mundi*, en y associant les planètes. En revanche, d'une façon générale, les théoriciens de la musique s'intéressent peu aux phénomènes naturels de la propagation des sons.

En ce début du XVII<sup>e</sup> siècle, on sait depuis l'antiquité que les corps sonores tremblent après le choc initial, et communiquent ces tremblements<sup>196</sup> à l'air environnant. On suppose que c'est l'air, avec tout ce que cette notion amène d'imprécision, qui 'transporte' le son. Mais le son a-t-il une existence propre qui lui permet d'être 'transporté'? Par ailleurs on connaît mal le mode de production des sons, pourquoi certains corps sont sonores et d'autres non, si ce n'est par une vague classification entre matériaux mous et durs. On ne sait rien de la nature du mouvement sonore, ni de la relation du 'tremblement' à la hauteur, et encore moins du caractère propre à chaque son, 'couleur' ou timbre dira-t-on plus tard. Par ailleurs on n'explique pas la coexistence, dans un même milieu, de plusieurs sons, discernables mais sans interaction. Les seules connaissances concernent les intervalles musicaux et les rapports de longueurs de cordes qui les définissent, héritages du savoir pythagoricien transmis et approfondi par Aristoxène, Euclide, Ptolémée, puis par Boèce et par les musiciens arabo-musulmans comme Al-Farabi et Ibn-Sina.

L'approche physique des phénomènes sonores est pratiquement inconnue, elle est principalement contenue dans le chapitre 8 du second livre du *De anima* d'Aristote. Tout au plus sait-on que, après lui, quelques stoïciens, puis Vitruve ont proposé une analogie du mouvement du son avec celui des ondes apparaissant à la surface de l'eau lors d'une perturbation. Les sons se propageraient donc sous forme de vagues d'air, l'hypothèse sera reprise de façon approximative par les Scolastiques. Une autre approche, défendue par les Atomistes, est

<sup>196</sup> Les auteurs anciens ne parlent pas de vibration, terme souvent utilisé par les traducteurs de façon anachronique. Les termes latins employés par Boèce notamment, sont *pulsus* (ébranlement) ou *tremor* (tremblement). A la suite de ces interprétations approximatives, on a attribué à tort à Aristote la découverte des vibrations (à partir du XIX<sup>e</sup> siècle). Aristote et ses successeurs utilisent le terme *plègè* (πληγή) qui signifie 'coup'. On fera la même remarque au sujet du terme 'fréquence' qui n'apparaît qu'au milieu du XVII<sup>e</sup> en ce qui concerne les mouvements de vibrations.

résolument corpusculaire. Elle suppose une émission de particules, du corps sonore vers le tympan, dont on ne sait si la vitesse de propagation est liée à l'intensité ou à la hauteur. La théorie scolastique, qu'on qualifierait à tort d'ondulatoire, des vagues de l'air produites par les vibrations du corps sonore suppose également une succession de 'coups' venant frapper l'oreille. Finalement les deux approches ne sont pas si éloignées, et on aurait tort d'y voir une rupture comme celle qui aura lieu plus tard entre les théories corpusculaires et ondulatoires de la lumière.

Parmi les pionniers de l'explication physique du mouvement accompagnant le son, on trouve, au début du XII<sup>ème</sup> siècle, Robert Grosseteste, qui, dans un court texte, *De generatione sonorum*, tente une description du mouvement alternatif des parties du corps sonore<sup>197</sup>. A cette époque, les Franciscains ont momentanément représenté un courant expérimentaliste dont l'influence va décroître au cours des siècles suivants.

A la fin de la Renaissance, la connaissance de la nature est détenue et édictée par les Dominicains, et par les Jésuites récemment investis par l'Eglise de la mission d'établir une science et un enseignement compatibles avec le dogme catholique. Cette science est d'inspiration scolastique, fondée sur la physique d'Aristote adaptée principalement par Thomas d'Aquin et Albert le Grand.

### La physique des sons chez Suarez, Jésuite de tradition scolastique

On trouve un exemple de texte scolastique traditionnel quoique tardif chez le Jésuite espagnol Francisco Suarez, dans son commentaire sur le *De anima*<sup>198</sup>. Cet ouvrage, paru en 1621 mais sans doute rédigé avant 1600, se présente comme un recueil de discussions (*disputationes*), selon la pratique en vigueur dans l'enseignement pratiqué par les Jésuites. Une *disputatio* parmi d'autres concerne les sensations, et traite longuement de l'audition<sup>199</sup>. La tradition scolastique, en effet, étudie de nombreux phénomènes naturels à partir des sensations.

Dans ce type de texte, on trouve généralement de longs développements rhétoriques destinés à rendre compatibles les nouvelles acquisitions de la connaissance avec le dogme immuable. C'est ainsi que, à propos du son, la question est de savoir si le son est un 'mouvement', au sens aristotélicien (*kinesis*), et si c'est un 'mouvement de qualité' ou un 'mouvement local'. Les conséquences sont nombreuses et débattues, par exemple la notion de 'perfection' (*perfectio*), qu'on pourrait traduire par 'achèvement' et qui évoque le statut temporel du processus, achevé pour la 'qualité' ou non achevé pour le mouvement<sup>200</sup>.

Sonus est qualitas sensibilis proveniens ex violenta percussione vel divisione in corpore apto ad recipiendum illum.

Le mouvement local est à l'origine du son nécessairement produit par un choc (*ex violenta percussione aut divisione*), mais le son est une 'qualité' lors de sa perception. La difficulté provient de la nécessaire durée du processus. Si le son se propage comme un mouvement local, il y a donc transport de matière, et on aborde les zones dangereuses de l'atomisme, théorie proscrite notamment à cause de l'existence du vide qu'elle suppose. Le son est donc forcément instantané. Cette instantanéité du son est difficile à accepter. Alors Suarez dit que le son est une 'qualité successive' (*qualitas succesiva*), pour justifier qu'il prend du temps à se propager. Le débat est complexe et confus, il avait été traité par Alexandre d'Aphrodise en son temps<sup>201</sup>. Il s'agit de préserver une classification des transformations de la matière qu'Aristote a édictée et qu'il est inconcevable de remettre en cause. L'adoption de la notion de mouvement constitutif de la nature du son remettrait en cause l'ensemble de l'édifice, car il supposerait un transport de matière, et donc l'existence de corpuscules invisibles ainsi que l'existence du vide. Cette théorie défendue par Epicure est fermement condamnée par l'Eglise depuis son origine. Associer le mouvement local à la propagation du son est décidément bien ennuyeux pour les Scolastiques.

<sup>197</sup> voir partie I, chapitre 4.

<sup>198</sup> Comme beaucoup d'autres scolastiques, Suarez a commenté le *De anima* d'Aristote, et notamment en ce qui concerne le son, le chapitre 8 du livre II.

<sup>199</sup> Les extraits qui suivent sont tirés de : Francisco Suarez, *De anima*, Lyon, 1621, ed. critique par Salvator Castellote, Valencia, 1992. *Disputatio septima*; *De sensibus exterioribus in particulari. Quaestio 6: Quid sonus sit et quomodo et in quo subiecto fiat*.

<sup>200</sup> *Id.*

<sup>201</sup> Sur l'interprétation d'Aristote (*De anima* et *De sensu et sensibili*) par Alexandre d'Aphrodise au III<sup>ème</sup> siècle (*In librum De sensu commentarium*), voir : Alan Towey, "Aristotle an Alexander on Hearing and Instantaneous change : A dilemma in Aristotle's Account of Hearing", in *The second sense, studies in hearing and musical judgement from antiquity to the seventeenth century*, Warburg Institute, University of London, 1991. Robert Pasnau de l'Université du Colorado, a également traité cette question : Robert Pasnau, "Sensible Qualities, the Case of Sounds", in *Journal of the History of Philosophy*, 38, janvier 2000, p. 27-40.

Pour Suarez et les Péripatéticiens, le son est causé par une ‘percussion violente’ ou par une ‘division’. L’approche percussive et du choc initial provient directement du *De anima* d’Aristote, livre II, chap. 8. La notion de ‘division’ a été rajoutée plus tard par les exégètes pour expliquer la production d’un son sans choc, comme dans le cas de la voix ou des instruments à vent. Il s’agit alors d’une ‘division’ de l’air. Différents cas sont possibles<sup>202</sup> :

[...] est notandum, sonum aliquando causari ex percussione duorum corporum solidorum; aliquando ex divisione unius; aliquando ex percussione aeris, ut in voce; aliquando ex divisione vehementi aeris.

Pour les Scolastiques, le son est donc intrinsèquement lié au choc et non au mouvement de l’air. Approcher la physique des sons par l’étude de la perception conduit à considérer le son comme accessoire à l’audition. Sa réalité est conditionnée à la perception, le son n’a pas d’existence propre. Ce n’est pas un phénomène physique, mais une qualité intermédiaire entre le corps sonore percuté et l’organe de l’ouïe disposé à l’entendre.

On sait que, pour de nombreux aristotéliens, la vue procède de sortes d’émanations incorporelles venant des objets, les ‘espèces intentionnelles’, et Suarez, comme d’autres, proposent, pour l’audition, une hypothèse analogue. L’audition consisterait donc dans la réception par l’oreille d’images (*species*) représentant le son initial causé par le choc de deux corps.

### L’approche des Franciscains

La nature matérielle ou ‘intentionnelle’ du son a longuement été débattue, et les Franciscains, après Robert Grosseteste et Roger Bacon, défendent la matérialité du son. On retrouve cette approche chez Titelmans, Franciscain Flamand du XVI<sup>e</sup> siècle. Après avoir énoncé les différents processus de perception des quatre autres sens qui trouvent leurs principes ‘dans la chose’ (*in re*), que ce soit la couleur, la saveur, le goût ou le toucher, Titelmans affirme la singularité du son<sup>203</sup> :

Solus autem sonus non est in re quae auditur, sed ab ea tantum procedit, et in medio recipitur. Solus etiam sonus in ipso medio realiter existit.

(en revanche, seul le son n’est pas dans la chose qui est entendue, mais est seulement émis par elle, et se perçoit dans le milieu. Et aussi seul le son existe réellement dans le milieu lui-même).

Titelmans attribue une existence propre au son, indépendante du processus de collision qui le génère. Cette idée provient de la lecture du *De sensu et sensibili*, qui semble-t-il n’était pas si fréquente de la part des Scolastiques, du moins en ce qui concerne le son<sup>204</sup>. Le milieu (l’air, ou l’eau qu’Aristote accepte) est essentiel à la réalité du son qui a presque une nature matérielle et en tout cas non intentionnelle pour reprendre le vocabulaire aristotélien. Et la conclusion, c’est que le son est un mouvement, pas au sens strictement aristotélien de mouvement local, mais dans sa signification commune, le transport d’une extrémité à l’autre d’une ‘information’ que Titelmans ne décrit pas, mais qui possède sa propre existence. Le mouvement local n’intervient que lors du choc sonore :

Fit autem sonus non absque locali motu. Cum enim sonus non fiat sine collisione et concussione, percussio vero non absque motu ; consequens est nec sonum posse fieri absque motu.

(Par ailleurs, il n’y a pas de son sans mouvement local. Comme en effet le son ne se fait pas sans collision et violente secousse, une telle percussion ne se fait pas sans mouvement. En conséquence, il ne peut y avoir de son sans mouvement)

L’argumentation est directement issue du *Traité de l’âme*, et, en réaffirmant, après Aristote, la nécessité du mouvement dans le processus de production sonore, Titelmans établit néanmoins qu’il n’y a pas de son sans mouvement, et cette phrase (*nec sonum posse fieri absque motu*) n’est pas dans le *De anima*, ce qui finalement laisse la porte ouverte.

### La physique mondaine de Scipion Dupleix

Aux côtés de cette Scolastique d’inspiration chrétienne, un enseignement très conventionnel est professé, non seulement dans les universités et dans les collèges, mais également dans la société cultivée et dans la noblesse. On trouve ce type d’enseignement mondain chez Scipion Dupleix (1569-1661), que Marguerite de Valois amène à Paris de son Béarn natal, afin notamment de former Antoine de Bourbon, fils d’Henri IV, à une

<sup>202</sup> F. Suarez, *id.*

<sup>203</sup> François Titelmans, *Compendium philosophiae naturalis*, Lyon, 1564, liber IX, *Considerationis physicae de sensibus exterioribus*, Cap. VI, *De sono qui est objectus auditus*, p 271.

<sup>204</sup> Aristote, *De sensu et sensibili*, chap. VI.



certaine culture scientifique. Dupleix deviendra par la suite l'historiographe de Louis XIII. En 1603 paraît un cours de philosophie complet comprenant notamment un traité de physique<sup>205</sup>. Cet ouvrage sera réédité de nombreuses fois jusqu'en 1640, et, même s'il est abandonné rapidement, il a sans doute eu une grande influence sur la formation des élites au début de l'époque moderne.

Ce traité est très conventionnel et d'inspiration aristotélicienne, sans polémique, et dans un style qui se veut agréable (Dupleix est assez satisfait de son œuvre. La physique d'Aristote y est décrite longuement et avec précision, et la nature du son fait l'objet d'un chapitre, à l'occasion de l'étude de la perception, bien entendu abordée selon le *De anima*. Dans les éditions suivantes, Dupleix y ajoute un chapitre destiné à corriger certaines affirmations peu compatibles avec les publications de Francis Bacon et de Mersenne sur le sujet.

Par ailleurs, comme dans tous les ouvrages de philosophie naturelle, on évoque le retard du son sur la lumière à propos du tonnerre et de l'éclair, ainsi que la réflexion des sons lors de la description du phénomène de l'écho. Par tradition et par convention, on attribue généralement le retard du son à la moindre sensibilité de l'ouïe par rapport à la vue<sup>206</sup> :

« Et quoy que ceste flamme paroisse la premiere, si est-ce qu'elle suit le bruit et l'esclat du tonnerre : et neantmoins nous la voyons avant que nous oyons le tonnerre, parce que la veüe est un sens beaucoup plus subtil que l'ouïe, ainsi que dit tres-bien Horace :

Des oreilles l'object est bien plus tard receu / Que ce qui est des yeux clairs-voyans apperceu. »

Comme souvent la preuve est apportée par une citation d'auteur ancien, et c'est bien suffisant quand le problème est ennuyeux.

Le chapitre concernant l'ouïe est plus conséquent, et commence par l'importance de ce sens, puisque « c'est celui par lequel nous apprenons les mysteres de la religion et les preceptes des sciences »<sup>207</sup>...

L'object de l'ouye, c'est le son, qui n'est autre chose qu'une qualité perceptible par l'ouïe qui procede de l'entre-heurt de deux corps.

Par cet énoncé quelque peu tautologique, on réconcilie les Franciscains et les Scolastiques, puisque le son est l'objet de l'ouïe, tout en étant une 'qualité'. Le dogme est respecté, puisque le son procède d'un choc. Mais ce choc doit se produire dans un troisième terme, nécessaire, le médium, le plus souvent l'air. Dupleix continue ainsi au cours de ce chapitre en paraphrasant le *De anima*, jusque dans ses expressions ('Voilà pour le regard du son en général', qui conclut l'exposé d'Aristote sur la nature physique du son).

Beaucoup plus intéressante est la conclusion du chapitre, absente de l'édition princeps (1603), et qui nécessite et introduit un exposé que Dupleix ajoute dans ses éditions suivantes<sup>208</sup> :

Au demeurant, c'est parler populairement et avec le vulgaire, quand nous disons que la veüe est plus prompte que l'ouïe, et qu'à ceste cause nous voyons plustost l'esclair que nous n'entendons le tonnerre. Car ce n'est pas la vraie cause : ains c'est que la lumiere peint l'object en l'air en un instant, et le son se fait avec mouvement et transport qui ne peut estre qu'avec quelque espace de temps.

Dupleix, qui n'est pas entravé par le dogme ecclésiastique, peut librement amender ses énoncés précédents et tenir compte des dernières observations faites par Francis Bacon et Marin Mersenne. En effet, le son prend du temps à se propager, il serait absurde de continuer à nier cette observation. Et Dupleix en tire le corollaire concernant l'étendue de l'agitation de l'air lors de l'émission d'un son :

Et de là vient ceste fascheuse question, à sçavoir si l'air est agité aussi loin et en toute l'estenduë que le son est ouy, laquelle il nous faut resoudre avec les autres doutes touchant le subject de l'ouye.

Et Dupleix intitule donc ainsi son chapitre additionnel : « Résolutions d'aucunes doutes touchant l'ouye. ». Ce passage se présente comme une réponse à quelques détracteurs. Dans un premier temps Dupleix plaide contre le soupçon d'atomisme qu'on a pu formuler envers lui. Lorsque le son se propage, même loin, c'est bien l'air qui est agité, en une seule masse, et à une distance en rapport avec 'l'effort de l'entre-heurt des

<sup>205</sup> Scipion Du Pleix, *La Physique ou Science naturelle divisée en huit livres*, Paris, 1603...1640, Réédition, Paris, Fayart, 1990, d'après l'édition de Rouen de 1640.

<sup>206</sup> Scipion Dupleix, *La physique*, rééd. Fayart, Paris, 1990, liv. VII, chap. 5, p. 428.

<sup>207</sup> *Id.*, liv. VIII, chap. 15, p. 583-589, p. 585.

<sup>208</sup> *Id.* p. 589.

corps sonnans'. Ce sont les propriétés de 'labilité, de ténuité et de simplesses' de l'air qui lui permettent une agitation se propageant aussi loin. Puis il répond aux philosophes modernes<sup>209</sup>:

Et quoy donc, m'objectera quelqu'un, où est-ce qu'est le son ? Est-il aux corps qui s'entre-heurtent et sonnent, comme à la cloche, ou au moyen, comme à l'air ? Ceste question est bien fascheuse à résoudre.

Car il semble de premier abord, et y a grand'apparence, que le son soit ès corps s'entre-heurtans et sonnans, tout ainsi que la couleur au corps coloré, et l'odeur au corps odoriferant, la saveur au corps sapide ou savoureux, non pas en l'air.

Toutesfois il n'est pas de mesme de l'ouye que des autres sens, d'autant que les autres ont leur object permanent et attesté, et le son n'est que pendant ce moment que deux corps s'entre-heurtent : tellement que comme j'ay montré cy-dessus que le son se fait non pas en l'entre-heurt des corps, ains en la fracture et collision du moyen. Ainsi faut-il ici tenir que le son n'est pas ès corps s'entre-heurtans, quoy qu'ils soient la cause efficiente du son, ains au corps rompu par leur conflict et entre-heurt.

Par exemple le son n'est pas en la cloche qui sonne, ains en l'air battu et rompu entre le marteau et la cloche.

Tout en s'appuyant sur la thèse aristotélicienne (le son est le choc de deux corps avec le médium), Dupleix, comme Titelmans, s'en éloigne puisqu'il admet à présent que le son est un mouvement de l'air (du médium) consécutif au choc des corps sonores. Cette nuance constitue la principale divergence sur la nature du son entre la science scolastique et la science expérimentale en gestation.

Avec Dupleix s'achève l'approche scolastique et aristotélicienne de la physique des sons.

Pour les Scolastiques, le son est une 'qualité' qui accompagne le choc et qui s'accomplit dans la perception sensible. Le son n'a pas de réalité propre, mais c'est une 'qualité successive', argutie destinée à justifier la durée de propagation difficilement acceptable par le dogme, mais peu contestable au regard de l'observation de la nature. Le son n'existe qu'à l'instant de sa production par le choc de deux corps sonores dans un milieu agité en une masse unique et continue qui communique cette agitation à l'air interne de l'organe de l'audition.

On le voit, la démarche dogmatique des Scolastiques, plus préoccupée de préserver un savoir figé que de construire une connaissance à partir d'observations, conduit inévitablement à ces approximations, et finalement à des impasses.

## ***De l'« Ecole », faisons table rase...***

La fin de la Renaissance voit apparaître des savants qui s'opposent à la science scolastique. Ce mouvement d'idées, qui prend naissance en Italie, va progressivement initier une méthode de raisonnement et d'acquisition de la connaissance fondées sur l'observation, l'expérimentation et l'élaboration d'hypothèses vérifiables.

### **Benedetti, un pionnier de l'opposition à Aristote**

Dans une lettre à Cipriano Rore, musicien renommé à Venise, datée de 1563, Giovanni Battista Benedetti propose un modèle de la propagation des sons, fondé sur l'observation des consonances. Adeptes de la théorie des 'vagues', il explique que deux cordes de longueurs dans un rapport de 2 : 1 émettent des coups, également dans ce même rapport, c'est-à-dire que la plus courte émet deux coups pendant que la plus longue n'en émet qu'un, puisque le mouvement de la plus longue est deux fois plus lent que celui de la plus courte. Cette lettre a été reprise dans un ouvrage regroupant divers textes concernant la physique et les mathématiques, paru en 1585<sup>210</sup>.

Nec alienum mihi videtur a propositio instituto, speculari modum generationis ipsarum simplicium consonantiarum ; qui quidem modus fit ex quadam aequatione percussionum, seu aequali concursu undarum aeris, vel conterminatione earum.

<sup>209</sup> *Id.*, liv. VIII, chap. 16, p. 591-594, p. 593.

<sup>210</sup> Giovanni Battista Benedetti, *Diversarum speculationum mathematicarum et physicarum liber*, Turin, 1585, p. 283.

[..] Videamus igitur ordinem concursus percussionum terminorum, seu undarum aeris, unde sonus generatur.

Benedetti spécule ici sur le mode de génération des consonances simples (unisson, octave et quinte), qui sont produites par une certaine 'égalité' des percussions ou plutôt une 'égalité de concours' (coïncidence) des ondes de l'air ou de leurs 'terminaisons'. Il décrit ensuite le processus pour l'octave et la quinte, et conclut : « nous pouvons donc voir l'ordre de la coïncidence des terminaisons des percussions ou des vagues de l'air d'où se produit le son ». Cet 'ordre de coïncidence' détermine la consonance, soit deux coups et un coup pour l'octave, trois coups et deux pour la quinte. Ce qui est remarquable dans cet extrait c'est l'introduction d'un dénombrement des événements (les percussions analogues aux vagues de l'air, *undarum aeris*) qui les associe à la hauteur des sons. On assiste donc ici à une approche physique et mathématique des phénomènes sonores, qui associe à la hauteur des notes, non pas comme le faisait Zarlino dans son *senario*, des nombres magiques censés promouvoir l'harmonie, mais des quantités mesurables, des coups correspondant aux vagues de l'air dont les rapports de leurs nombres définissent les intervalles. Il ne s'agit pas de compter ces coups, ni de vérifier la pertinence de cette hypothèse, c'est une pure spéculation, Benedetti n'est pas un expérimentateur.

Cette approche mathématique est fondatrice de la théorie des vibrations qui sera développée peu après par Galilée dans les *Discorsi*. On la retrouve également chez deux savants flamands du début du XVII<sup>e</sup> siècle, Stevin et Beekman.

Notons que cette théorie de la coïncidence des coups perdure jusqu'au début du XVIII<sup>e</sup> siècle, notamment chez le jeune Euler dans le *Tentamen novae theoriae musicae* (St Petersburg, 1739)<sup>211</sup>.

Il est probable que lorsqu'il évoque les 'vagues de l'air' à propos du son, Benedetti s'inspire des conceptions développées auparavant par Girolamo Fracastoro sur la nature du son. Dans un texte de 1546, *De sympathia et antipathia rerum*, le Vénitien Fracastoro (1478-1553), surtout réputé pour ses ouvrages sur les maladies contagieuses, étudie les vibrations par sympathie de deux cordes proches dont l'une sonne et fait 'résonner' l'autre. Il en déduit alors une conception de la propagation du son faisant intervenir des alternances de condensation et de raréfaction de l'air (*addensatio et rarefactio*).

### Francis Bacon, de « *Historia soni et auditus* » à « *Sylva sylvarum* »

On attribue généralement la paternité de la méthode expérimentale et du raisonnement par induction à Francis Bacon. Inspiré par la lecture du *De rerum natura* de Bernardino Telesio, il prolonge avec audace la critique des thèses scolastiques et s'en prend vigoureusement dans le *Novum organum* à la logique et à la physique d'Aristote.

Francis Bacon esquisse une première étude du son dans *Historia soni et auditus*<sup>212</sup>, texte jamais édité datant probablement de 1608, que le philosophe utilisera lors de la rédaction des deux chapitres consacrés au son dans *Sylva sylvarum*<sup>213</sup>, ouvrage d'Histoire naturelle paru en 1627, peu après la disparition de Francis Bacon. Il aborde également le sujet dans un court passage de *New Atlantis*, à l'occasion d'une énumération de certains procédés et instruments futuristes utilisant des propriétés particulières du son, telles que la réflexion.

Les deux chapitres traitant du son dans *Sylva sylvarum* représentent un travail d'observations important qui n'avait pas été effectué auparavant. Une lecture de la table de ces deux 'centuries' permet d'apprécier l'étendue de ces recherches :

#### CENTURIE II.

Expériences et observations diverses sur les sons et la musique.

Expériences et observations diverses sur les tons, et premièrement sur les corps et les mouvements sonores ou non sonores.

Expériences et observations diverses sur la production, la conservation, la transmission du son, et les fonctions de l'air, dans ces trois cas.

Expériences et observations sur les causes qui rendent le son plus gros ou plus grêle, et sur celles qui l'éteignent ou l'amortissent.

<sup>211</sup> Voir à ce sujet : Patrice Bailhache, Deux mathématiciens musiciens, Euler et D'Alembert, in *Physis*, XXXII/1 (1995).

<sup>212</sup> Francis Bacon, *Historia soni et auditus*, ed. Spedding, London, 1859, vol.III, p.655-680. L'éditeur, J. Spedding, indique que ce texte a été publié par Dr. Rawley dans les *Opuscula philosophica* en 1688. Il constitue sans doute le début d'un ouvrage plus important jamais écrit, Tables de sono, dont Francis Bacon avait commencé la rédaction en 1608.

<sup>213</sup> Francis Bacon, *Sylva sylvarum*, 1627, ed. Spedding, London, 1859, vol II.

Expériences et observations diverses sur la communication des sons.  
 Expériences diverses concernant l'égalité et l'inégalité des sons.  
 Expériences et observations sur des sons plus au moins graves ou aigus, et sur les sons musicaux.  
 Expériences sur la proportion d'où dépend la différence du grave à l'aigu dans les sons.  
 Expériences et observations relatives aux sons extérieurs et intérieurs.  
 Expériences et observations diverses sur des sons articulés.

### CENTURIE III.

Expériences et observations concernant les mouvements des sons, du centre à la circonférence, selon toutes les directions possibles, dans des lignes droites, courbes, etc. de bas en haut, de haut en bas, d'avant en arrière, d'arrière en avant.  
 Expériences et observations diverses concernant la durée et l'extinction des sons, ainsi que leur génération et leur propagation, ou transmission.  
 Expériences et observations sur la transmission et la non transmission des sons.  
 Expériences et observations sur le milieu qui transmet le son.  
 Expériences et observations pour savoir comment et combien la figure des corps de flûtes ou d'autres semblables concavités, et en général celle des corps déferents influe sur les sons.  
 Expériences et observations sur le mélange des sons.  
 Expériences et observations diverses sur les causes ou circonstances qui peuvent rendre les sons plus agréables.  
 Expériences et observations diverses sur la faculté d'imiter les sons.  
 Expériences et observations sur la réflexion des sons  
 Expériences et observations sur les analogies et les différences qui existent entre les choses visibles et les choses sensibles à l'ouïe.  
 Analogies entre les choses visibles et les choses sensibles à l'ouïe.  
 Différences entre les choses visibles et les choses sensibles à l'ouïe.  
 Expériences et observations diverses concernant la sympathie et l'antipathie réciproque des sons.  
 Expériences et observations diverses concernant les obstacles et les secours relatifs à l'ouïe.  
 Expériences et observations diverses sur la nature immatérielle et subtile des sons.

Francis Bacon est un savant prudent. Il intitule ses paragraphes 'expériences', il observe beaucoup. A-t-il réellement expérimenté sur le son ? Nous n'en savons pas grand-chose, et Bacon ne nous livre aucune indication. Néanmoins il propose des pistes inédites, et ses réflexions sont le fruit de spéculations pertinentes et souvent cohérentes.

Si Francis Bacon convient, avec les aristotéliens, qu'il faut un choc entre deux corps dans un milieu (air ou eau) pour produire un son, il attribue un rôle majeur à l'air (au milieu) mis en mouvement par le choc initial. Il distingue les mouvements sonores de ceux qui ne le sont pas, et précise que l'air doit résister pour que le mouvement soit sonore. Ce n'est pas uniquement le mouvement d'air qui provoque le son. En effet, un mouvement d'air comme le vent ne produit pas de son. Pour qu'il y ait son, il doit exister une certaine concavité, un enfermement de l'air<sup>214</sup> :

Air open, and at large, maketh no noise, except it be sharply percussed; as in a sound of a string where air is percussed by a hard and stiff body, and with a sharp loose. For if the string be not strained, it maketh no noise. But where the air is pent and straitened, there breath or other blowing (with carry but a gentle percussion), suffice to create sound ; as in pipes and wind-instruments.

[L'air à l'état libre, de manière générale, ne produit pas de son, sauf dans l'exemple du son produit par une corde où l'air est percuté par un corps solide et raide accompagné d'un mouvement vif. En effet, si la corde n'est pas tendue, elle ne produit pas de son. Mais dès lors que l'air est confiné et pressurisé, alors un simple souffle ou mouvement d'air, qui pourtant n'apporte qu'une légère percussion, suffit à créer un son. Il en est ainsi dans les tuyaux d'orgues et dans les autres instruments à vent.]

Pour Bacon, donc, le son est certes provoqué par une percussion de corps solides, ou par une perturbation ou encore par un mouvement d'air. Mais cette percussion doit se faire dans un air confiné pour produire un son suffisamment fort pour être entendu. Le rôle de l'air est ici affirmé comme important dans la production du son, Bacon y reviendra plus loin.

<sup>214</sup> Francis Bacon, *Sylva sylvarum*, 1627, ed. Spedding, London, 1859, vol II, century 2,116, p.391.

Depuis Aristote, lequel n'était pas musicien, on bute sur quelques problèmes non résolus par le principe du choc initial nécessaire pour produire un son, tel qu'il est défini dans le *De anima*. En particulier, le son produit par les instruments à vent et à cordes pose problème. Il a fallu alors imaginer la notion de 'l'air frappé' qu'on trouve dans le *De audibilibus* de Straton. Bacon s'attarde sur cette question et met à nouveau en avant le rôle joué par l'air dans la production du son, s'opposant ainsi à la théorie aristotélicienne. Bacon conclut ainsi le chapitre sur les corps et les mouvements sonores<sup>215</sup> :

I suppose that impression of the air with sounds asketh a time to be conveyed to the sense, as well as the impression of species visible; or else they will not be heard. And therefore, as a bullet moveth so swift that it is invisible, so the same swiftness of motion maketh it inaudible : for we see that the apprehension of the eye is quicker than that of the ear.

[Je suppose que cette impression de l'air porteur de son prend du temps pour parvenir aux sens, comme pour l'impression des espèces visibles. Et donc, comme un boulet se déplace avec une rapidité qui le rend invisible, de même, cette rapidité de mouvement le rend d'autant plus inaudible, car nous savons que la perception de l'œil est plus rapide que celle de l'oreille.]

La comparaison est audacieuse, Bacon dit que, de même qu'un objet animé d'un mouvement très rapide peut échapper à la vue, comme le boulet, de même si le son était très rapide dans son mouvement, il échapperait à l'ouïe. On retiendra de ce passage que Bacon affirme ici, contre Aristote, que le son prend du temps dans sa propagation. Par ailleurs, on sait que Bacon adoptait volontiers les thèses atomistes, on en a ici une illustration, par cette analogie d'un son matériel, sorte de flux sonore, qui se déplacerait 'sous nos yeux et nos oreilles', ainsi que par l'emploi de notions telles que '*impression of the air with sounds*' et '*species visible*', un vocabulaire typiquement atomiste.

Le chapitre suivant est important pour l'étude physique des sons, car il traite de la fonction de l'air dans la production et dans la propagation du son. Il commence par une attaque impitoyable contre la théorie scolastique enseignée jusqu'alors<sup>216</sup> :

The cause given of sound, that it should be an elision of the air (whereby, if they mean anything, they mean a cutting or dividing, or else an attenuating of the air) is but a term of ignorance ; and the notion is but a catch of the wit upon a few instances, as the manner is in the philosophy received.

[La cause attribuée au son, qui serait une 'élision' de l'air (par quoi ils [les Scolastiques] veulent dire, s'ils veulent dire quelque chose, une coupure ou une division, ou encore une atténuation de l'air) n'est que l'expression de leur ignorance. Et cette notion n'est qu'une tentative de faire de l'esprit à tout propos, comme il est d'usage dans la philosophie enseignée.]

Et Bacon continue sur ce ton pendant encore quelques lignes...

Le terme 'élision' est à prendre dans son sens latin, formé à partir du verbe '*elidere*' qui exprime l'idée d'expulsion violente, mais également de brisement. Par ailleurs, en anglais, le terme '*elision*' est utilisé, à cette époque, dans le langage technique pour exprimer une cassure provoquant une fente ou un intervalle (*gap*) et causée par une force mécanique. Comme on l'a vu chez Suarez ainsi que chez Dupleix, cette notion de l'air 'divisé' a été introduite bien après Aristote pour expliquer les phénomènes sonores dans lesquels il n'y a pas de percussion initiale, mais seulement un mouvement particulier de l'air, comme dans la voix ou dans les instruments à vent. On sait que les Aristotéliciens refusent l'hypothèse d'un mouvement d'air comme constitutif du son. S'il n'y a pas percussion de corps solides, c'est donc que l'air subit une 'division' causée par un choc, forcément nécessaire, entre un corps solide et l'air, ou d'un air sur un autre air ('air extérieur' et 'air intérieur', par exemple). Ce point pose le problème de la nature du son, percussion perçue instantanément ou mouvement d'air. Dans son argumentation, Bacon s'appuie sur plusieurs observations constatées notamment lors du tintement d'une cloche.

Bacon approfondit la question du mouvement d'air. Un mouvement local est associé à la percussion initiale, ainsi la présence d'un air qui résiste, par exemple lorsqu'il est confiné. Tout ceci est admis par Aristote. Mais à la différence d'Aristote, Bacon affirme que ce mouvement local n'est pas seulement celui du corps percutant, mais également celui de l'air percuté par le corps sonore<sup>217</sup> :

It is certain that sound is not produced at the first, but with some local motion of the air, or flame, or some other medium; nor yet without some resistance, either the air or the body percussed.

<sup>215</sup> *Idem*, p.393.

<sup>216</sup> *id.* 124, p. 393-394.

<sup>217</sup> *id.* 125, p. 394.

[Il est certain que le son n'est pas produit en premier, mais avec un certain mouvement de l'air, d'une flamme ou d'un autre médium, et pas non plus sans une certaine résistance de l'air ou du corps percuté.]

Le processus sonore est simultané au mouvement de l'air qui résiste.

Par ailleurs, pour Bacon le son n'est pas une qualité liée à la perception, ce qui le rendrait alors analogue à la lumière et aux couleurs<sup>218</sup> :

And therein sounds differ from light or colours, which pass through the air, or other bodies, without any local motion of the air, either at the first or after.

[Et en cela les sons diffèrent de la lumière et des couleurs qui traversent l'air ou les autres corps sans aucun mouvement de l'air, que ce soit au commencement, ou après.]

Mais il existe d'autre part un mouvement de propagation du son entre le corps sonore et l'organe de l'audition. Cependant Bacon tient à distinguer l'air porteur du son et le son lui-même<sup>219</sup> :

But you must attentively distinguish between the local motion of the air (which is but *vehiculum causae*, a carrier of the sounds) and the sounds themselves conveyed in the air. [...] And all pipes have a blast, as well as a sound. We see also manifestly that sounds are carried with wind ; and therefore sounds will be heard further with the wind than against the wind.

[Mais on doit attentivement distinguer le mouvement local de l'air (qui n'est que le véhicule de la cause, la 'porteuse' du son) des sons eux-mêmes transportés par l'air. [...] Et tous les instruments à vent produisent à la fois du vent et du son. Nous voyons aussi que les sons sont portés par le vent, et donc que les sons sont entendus plus loin sous le vent que contre le vent.]

Cette distinction est au cœur du problème. Quel est donc ce type de mouvement qui n'est pas un transport d'air, mais qui est un 'mouvement' d'air porteur du son ? C'est la question à laquelle Bacon ne répond pas et qui détermine la nature même du son. Cependant il sait exposer cette particularité du mouvement accompagnant le son par rapport à celui du vent<sup>220</sup>.

But for the impression of the sound, it is quite another thing, and is utterly without any local motion of the air, perceptible ; and in that resembleth the species visible. For after a man hath lured, or a bell is rung, we cannot discern any perceptible motion at all in the air along as the sound goeth, but only at the first.

[Mais pour l'impression du son, c'est tout à fait autre chose, et c'est sans aucun mouvement local de l'air perceptible ; en cela le son ressemble aux espèces visibles. En effet, après qu'un homme a crié ou qu'une cloche a retenti, nous ne discernons aucun mouvement perceptible dans l'air pendant que le son se propage, mais seulement au commencement.]

Malgré la tentation atomiste de considérer le son comme un flux de corpuscules, on voit que Bacon essaie de le représenter comme un mouvement auquel l'air participe, mais qui n'est pas un mouvement d'air. On mesure la difficulté d'une telle représentation.

Après l'exposé de cette nouvelle hypothèse sur la propagation des sons, Bacon fait certaines expériences sur la propagation du son dans les liquides, dans la matière solide et à travers une flamme. En effet, la matière est traditionnellement composée des quatre éléments en proportions différentes, et il convient d'évaluer leur capacité de propagation selon la proportion de chacun de ces éléments. Bacon constate des différences, mais peu importantes.

Le chapitre suivant traite des circonstances qui déterminent l'intensité sonore, à travers l'étude de plusieurs instruments de musique et d'autres dispositifs, comme les tuyaux qui permettent une propagation à grande distance. C'est également l'occasion d'aborder la réflexion du son.

On sait que Francis Bacon n'est pas mathématicien. Son approche de la compréhension de la nature est d'abord descriptive et empirique. L'expérience constitue pour Bacon une médiation entre la perception, source première de connaissance mais susceptible d'erreur, et la compréhension des phénomènes naturels qui forme le fondement d'une connaissance universelle à construire. On verra que l'approche mathématique par la définition

---

<sup>218</sup> *ibid.*

<sup>219</sup> *ibid.*

<sup>220</sup> *id.* 125, p. 395.

de grandeurs mesurables et la pratique de la mesure constituera avec Galilée le prolongement nécessaire de la méthode expérimentale initiée par Francis Bacon.

## Mersenne, un harmonisateur universel

Mersenne, religieux de l'ordre des Minimes, est un érudit, expérimentateur et mathématicien. En relation avec les savants de son époque, il est la cheville ouvrière de la communauté scientifique qui se constitue alors en Europe.

Le livre premier de *l'Harmonie Universelle*, ouvrage imposant dédié à la musique<sup>221</sup>, est consacré à la nature physique du son, et c'est sans doute ici le premier traité d'acoustique qu'on ait jamais écrit. L'ouvrage est commencé vers 1624 et après plusieurs versions, sera édité dans sa version définitive en 1637. En 1627 paraît à Paris un *Traité de l'Harmonie universelle*<sup>222</sup> d'un certain Monsieur de Sermes, anagramme incomplet de Mersenne. Ce traité, initialement composé de 16 livres, n'en comprend que les deux premiers, et traite de la théorie musicale d'un point de vue théologique et métaphysique, influencé par le platonisme ambiant. L'approche physique n'apparaît quasiment pas dans cet ouvrage. Il est probable que la lecture des chapitres du *Sylva sylvarum* de Bacon consacrés au son ait largement contribué à l'amendement de son texte premier, ainsi que le *De anima* de Suarez dont il réfute plusieurs thèses. Le travail de rédaction, un peu chaotique, de la version définitive est le résultat de ces différentes versions, et il n'est pas rare de trouver dans le volumineux ouvrage des contradictions et quelques incohérences entre des passages différents.

Lorsque Mersenne s'oppose à la doctrine d'Aristote, c'est toujours de façon feutrée, parfois ironique, mais sans polémique. Ainsi, dans le traité de 1627, le théorème VII a pour titre 'Le son est le principal objet matériel de la musique', et en effet Mersenne distingue ici la matière de la forme, le son étant la matière et la forme l'harmonie, selon le vocabulaire aristotélicien. Cependant, quelques lignes plus loin, il associe la matière et la forme dans une même entité<sup>223</sup> :

Néanmoins, si nous parlons de la musique plus amplement qu'à l'ordinaire, nous pouvons dire que les sons lui servent non seulement de principal objet matériel, mais aussi d'objet formel, car elle les considère absolument, et selon toutes sortes de raisons.

On trouve fréquemment dans *l'Harmonie Universelle* des critiques manifestes de la théorie scolastique enseignée jusqu'alors selon le livre II du *De anima*. C'est notamment le cas au début du livre premier, lors de considérations générales sur la propagation des sons.

Mersenne commence son ouvrage par ces lignes directement inspirées par la critique baconienne de l'approche scolastique de la perception<sup>224</sup> :

[...] il est donc à propos avant que passer outre de savoir si le Son, qui est le sujet ou l'objet de la Musique et de l'ouïe, a un être réel, et quel il est: car il s'en trouve plusieurs qui croient que le Son n'est rien, s'il n'est entendu, et que c'est une simple impression de l'air qui ne doit point être appelée Son, s'il n'y a quelque oreille qui l'entende et qui la distingue d'avec les autres choses; [...]

On sait que les Scolastiques défendent l'idée que le son n'existe que dans la sensation, qu'il s'agit d'une 'qualité' produite par un choc, et qu'il n'a pas de réalité propre. Pour Mersenne, le son, qui peut donc exister sans que nulle oreille ne soit présente, est forcément lié à un mouvement de l'air, ou éventuellement d'un autre fluide liquide. Là où Aristote insiste sur la nécessité d'un choc (« la condition déterminante du son n'est ni l'air ni l'eau; ce qu'il faut, c'est que se produise un choc de solides l'un contre l'autre et contre l'air », dit-il dans le *Traité de l'âme*), Mersenne déclare que « le son n'a point d'autre sujet que l'air extérieur ou les autres corps fluides qui environnent les corps sonnants. » Si Mersenne nous parle d'air extérieur, c'est pour mieux réfuter cette autre assertion scolastique concernant l'air intérieur, censé être contenu dans les pores de la matière et qui conférerait au son sa 'qualité', autrement dit son timbre. A ce sujet il objecte que dans ce cas, puisque les tenants de cette théorie affirment que la matière est constituée de terre, d'eau, d'air et de feu, alors le son devrait être affecté par ces autres éléments<sup>225</sup> :

Ceux qui disent que l'air intérieur apporte plusieurs différences aux Sons extérieurs, ou qui composent le Son du mouvement de l'air intérieur et de l'extérieur, qui est comme l'image ou le

<sup>221</sup> Marin Mersenne, *Harmonie universelle*, Paris, 1636, édition fac simile en 3 volumes, Paris, ed. CNRS, 1963.

<sup>222</sup> Monsieur de Sermes, *Traité de l'harmonie universelle* où est contenue la musique théorique et pratique des anciens et modernes, avec les causes de ses effets, Paris, 1627, réédition revue et commentée par Claudio Buccolini, Paris, Fayard, 2003.

<sup>223</sup> Marin Mersenne ('Monsieur de Sermes'), *Traité de l'harmonie universelle*, Paris, 1627, réédition Fayard, 2003, p. 55.

<sup>224</sup> Mersenne, *Harmonie universelle*, 1637, Paris, éditions CNRS, 1963 liv.I, prop. I., p. 1.

<sup>225</sup> *id.*, prop. III, p.7.

vêtement de l'autre, peuvent ajouter que l'eau et le feu qui sont dans les corps contribuent aussi à la différence des Sons, puisque ces deux éléments sont susceptibles du mouvement; car ceux qui tiennent que le feu est l'un des éléments qui composent les corps, sont obligés par leurs maximes de confesser que le feu est plus mobile que l'air, et conséquemment qu'il doit pour le moins apporter une aussi grande différence aux Sons que le mouvement de l'air.

Mersenne n'est pas tendre avec les dogmes scolastiques, et s'en amuse dans le paragraphe suivant :

Ils peuvent encore dire que les différents Sons que fait une même cloche, ou une même corde en même temps viennent des différents éléments, dont l'une et l'autre est composée, et que le Son plus grave et plus matériel qui paraît le plus fort est fait par la terre, le second par l'eau, le troisième par l'air, et le quatrième par le feu: ou s'ils n'ont que trois Sons, comme il arrive le plus souvent, qu'il faut attribuer le premier à la terre et à l'eau, le second à l'air, et le troisième au feu; et ceci posé ils peuvent dire que nul corps ne se meut qu'il ne fasse un concert de trois ou quatre parties, dont chacune représente son élément particulier. Mais je ne veux pas m'amuser ici à ces considérations, tant parce que j'estime que le Son n'a pas besoin d'autres mouvements que de ceux de l'air extérieur, que parce qu'il se rencontrera plusieurs autres lieux où cette opinion pourra être examinée plus particulièrement.

Selon la rhétorique en usage à cette époque, Mersenne détaille les théories avancées par ses adversaires avant de les réfuter une à une. Il procède ainsi dès la proposition II qui présente une attaque solide contre les Scolastiques, notamment Suarez. Quatre questions sont ainsi posées successivement auxquelles Mersenne répond tour à tour, après cette courte introduction qui donne le ton<sup>226</sup> :

Cette Proposition servira pour répondre aux objections qui se peuvent faire contre la précédente, et montrera pourquoi nous oyons de grands Sons, où les mouvements semblent être fort petits :

La première de ces questions est typiquement une question scolastique, sur le son envisagé comme qualité, sans mouvement d'air associé :

Ceux qui disent que le Son est différent du mouvement de l'air apportent plusieurs raisons, dont la première est que l'objet de l'ouïe doit être une qualité, comme celui des autres sens, et que le mouvement est un objet commun de tous les sens.

[...] Il faut donc dire que le Son étant simplement considéré en qualité de Son n'est rien de réel, qu'une simple considération et affection du mouvement. Si l'on examine l'objet des autres Sens, l'on trouvera qu'ils ne sont pas plus qualifiés que les Sons; par exemple l'objet du goût et du flairer consiste à l'évaporation et à l'exhalaison des petits corps qui sortent de l'objet que l'on goûte, ou que l'on flaire: l'objet du toucher n'est point différent de la quantité des figures et de leurs propriétés, comme sont le mol, le dur, le poly, et cetera.

Les autres questions portent sur des propriétés du son, telles que le son qui traverse mal les murailles, ou les conversations qui ne perturbent pas les sons entre eux, et sur les petits mouvements qui font de grands sons.

Mersenne évite de se mettre à dos les Philosophes ordinaires (ceux de l'ordre, du dogme), et il est prêt à faire des concessions, et à accepter les 'espèces intentionnelles' des Scolastiques, censées donner du sens aux fameuses 'qualités', concessions écrites qui finalement ne l'engagent pas trop<sup>227</sup> :

Toutefois je ne veux pas entièrement rejeter toutes sortes d'espèces intentionnelles soit du Son ou des autres objets, que mettent plusieurs pour établir une liaison plus délicate entre la puissance et l'objet, que n'est celle qui se fait par le moyen des qualités extérieures naturelles, matérielles et corporelles, comme s'il était nécessaire de les dépouiller de ce qu'elles ont de trop grossier, pour les élever à un degré d'être plus éminent et plus spirituel, afin que je n'ai nul différend avec les Philosophes ordinaires, et que ce que je dirai dans ces livres de Musique ne dépende de nulle opinion, et qu'il soit fondé sur la vérité de l'expérience et de la raison.

Par ailleurs Mersenne combat également les théories corpuscularistes d'Epicure et de Lucrèce, que défendra bientôt son ami Gassendi<sup>228</sup>. Il renvoie d'ailleurs ici les atomistes vers les aristotéliens, en opposant à la théorie de l'air qui se fractionne la théorie continuiste de l'air, défendue par Aristote, mais aussi par les stoïciens. Il modélise la propagation du son comme un ébranlement communiqué à cet air continu mais considéré comme un agglomérat de parties. La modélisation s'inspire du *De audibilibus*. On note que Mersenne signale l'affaiblissement avec la distance<sup>229</sup> :

<sup>226</sup> *Id.* prop.II.

<sup>227</sup> *Ibid.*

<sup>228</sup> *id.* prop. II, p. 5-6.

<sup>229</sup> *id.* prop. V, p. 9.



Quelques-uns s'imaginent que la même partie de l'air qui est battue, et qui fait le Son, se divise en une infinité de petites parcelles, semblables aux atomes de Démocrite, qui s'étendent en rond pour porter le Son de tous côtés: mais cela n'est pas nécessaire, et il n'y a nulle raison qui puisse persuader que la partie de l'air qui est frappée, se détache de l'air auquel elle est continue, pour aller se rejoindre à un autre air éloigné de deux ou trois mille pas: il suffit qu'elle ébranle l'air continu, et qu'elle lui communique le même mouvement qu'elle a reçu, quoique plus faiblement et avec diminution.

Dans le cas des ébranlements de Mersenne, on est donc avec un type de mouvement local particulier qui affecte l'air continu, mais qui est décrit et modélisé de façon encore très confuse. On parle ici de l'air qui cède sous l'impulsion, se déplace et reprend sa place après le coup. A l'inverse des successeurs d'Aristote, Mersenne approfondit la question de ce type de mouvement. Nullement encombré de la classification dans les catégories aristotéliennes (mouvement qualitatif de type *alloiosis* ou mouvement local), il tente de comprendre ce qui se passe dans ce mouvement de l'air qui est spécifique au son. Le développement de cette hypothèse occupe toute la proposition V. Le père Minime entrevoit que les sons pourraient se propager sous forme de déformations successives de l'air<sup>230</sup>:

Il y a ce semble plus d'apparence de dire que les autres parties de l'air se condensent pour céder à l'impétuosité de la partie agitée, quoiqu'il soit presque impossible de s'imaginer comme se peut faire la compression ou la condensation des parties de l'air, s'il ne contient du vide. Mais la difficulté sera plus aisée, si l'on ne s'amuse point au vide, ou à la raréfaction et à la condensation. Car l'on peut dire, quand une partie de l'air a été frappée, que les autres parties voisines succèdent aussitôt en sa place, et que toute la masse de l'air se meut, lorsque l'une de ses parties change de lieu, comme il arrive dans les bains où l'on se lave, dont toute l'eau se meut à chaque mouvement du corps.

Pour Mersenne, donc, qui venait auparavant de rejeter l'hypothèse de l'existence du vide qui aurait contrarié sa fidélité au dogme catholique, c'est la masse d'air qui se meut lorsqu'un son se propage. On sent bien qu'il est près de percevoir le mouvement ondulatoire sans transport de matière, mais l'abstraction est grande, et l'expérimentation difficile.

A présent, Mersenne, qui a exposé le processus de propagation du son, s'intéresse à ses propriétés, et notamment à la hauteur du son<sup>231</sup>:

Si la nature du Son n'est pas différente du mouvement de l'air, comme j'ai dit dans les deux premières propositions, il n'est pas nécessaire de prouver cette sixième. Mais, parce que plusieurs ajoutent une nouvelle qualité aux mouvements, je dis qu'elle est toujours véritable, quelque qualité ou espèce intentionnelle que l'on veuille ajouter, d'autant qu'elle suit les différences du mouvement de l'air qui fait le Son fort ou faible, grave ou aigu, net ou obscur, suivant les différents battements de l'air, comme l'on expérimente aux cordes des instruments et aux tuyaux d'orgues, dont les Sons paraissent d'autant plus graves qu'ils battent moins de fois l'air, et d'autant plus aigus qu'ils le battent plus de fois. De sorte que si l'on compare deux quantités d'air égales ou inégales, dont l'une soit battue quatre fois tandis que l'autre est battue deux fois, l'on trouvera perpétuellement que le premier Son sera double de l'autre, et que l'un aura autant de degrés d'aigu, comme l'air, dont il vient, aura été battu de fois.

Mersenne, qui comme Beeckman connaissait sans doute les travaux de Benedetti, perçoit l'importance du nombre de coups dans la hauteur du son. Il vérifiera cette proposition par l'expérience, au moyen d'une longue corde faiblement tendue mise en rapport avec une plus courte dont il connaît précisément la note. On entrevoit donc, au début du XVII<sup>e</sup> siècle, l'importance, dans le processus sonore, du nombre de coups, ou de 'vibrations' même si la notion est encore peu claire, et de leur relation avec la hauteur de la note.

Le premier tiers du XVII<sup>e</sup> siècle est, pour l'avancement des Sciences, le siècle de Bacon, de Galilée, et de Mersenne. A part Galilée qui n'a jamais pu mener à bien son projet de 1610 d'écrire un *De sono et voce*, trop occupé sans doute depuis que quelqu'un avait eu l'idée curieuse de lui apporter une lunette, Francis Bacon et Marin Mersenne ont tous les deux observé, expérimenté et écrit longuement sur la nature physique du son. C'est tout à fait nouveau et la voie est ouverte vers la création d'une nouvelle branche du savoir qui n'existe pas encore, écartelée entre la Musique et l'étude de la perception.

<sup>230</sup> *id.*, prop. V, p. 10.

<sup>231</sup> *Id.*, prop. VI.

## 2 - Le temps du son : l'écho

En 1718, l'Académie Royale des Sciences de Bordeaux propose un concours de dissertations dont le sujet est l'explication du phénomène de l'écho. C'est l'abbé Hautefeuille qui remporte le prix. En introduction à sa composition, on trouve cette préface qui introduit et résume assez bien la problématique<sup>232</sup> :

La physique offre aux savants diverses questions à éclaircir, sur lesquels les progrès faits dans cette science ne sont pas encore sensibles. Celle de l'écho est de ce nombre : les physiciens de cabinet sont au niveau de ceux de l'école sur cette matière ; ce n'est pas qu'elle n'ait été assez souvent traitée, tous les livres nous en parlent, mais ils ne nous en apprennent rien. En mettant à l'écart les partisans des qualités occultes, ou (ce qui revient au même) des vertus sonnantes et résonantes, l'Echo, si nous en croyons nos auteurs les plus habiles, ne consiste que dans la réflexion du son ; mais qui ne s'aperçoit de la fausseté, ou tout au moins de la défectuosité de cette définition. L'expérience nous enseigne que si l'on parle au devant d'une muraille si haute et si large que l'on voudra, supposons-la même de marbre le plus dur et le plus poli, l'air mu et modifié qui forme la voix sera poussé contre cette muraille, et sera ensuite réfléchi, sans qu'il y ait d'écho. Ainsi, quoiqu'on ne puisse pas disconvenir que la réflexion de cet air mu et modifié ne soit nécessaire pour produire l'écho, il faut aussi avouer qu'il est évident que cette réflexion ne suffit pas pour expliquer la nature de ce phénomène. Cette difficulté se présente d'abord. Il faut donc suppléer quelque chose à cette définition ; et ce qu'il y faut suppléer sera précisément ce que l'on demande.

C'est par cette considération que l'Académie proposa pour sujet du prix dans son dernier programme l'explication de la cause de l'écho.

Il faut saluer la clairvoyance et la simplicité scientifique de ces académiciens. Car en effet, si l'écho a fait l'objet de nombreuses descriptions, et si tous les savants sont d'accord sur la cause principale de l'écho qui est dans la propriété de réflexion des sons, on ne connaît toujours pas, au XVIIIème siècle, ni peut-être plus tard, les paramètres qui déterminent la production de l'écho sonore, ce qui permettrait, comme le propose Francis Bacon, d'en produire d'artificiels.

Comme beaucoup de phénomènes naturels, on peut en faire l'histoire selon trois périodes. Dans l'Antiquité et aux temps médiévaux, l'écho est d'abord un phénomène inexplicable et dont l'explication n'est finalement désirée par personne. On se contente alors de répéter et d'enjoliver des légendes. Quelques philosophes tentent néanmoins une analyse du phénomène. Puis, vers la Renaissance, avec l'apparition de la Magie Naturelle, l'écho prend une place au sein des prodiges de la nature, au même titre que les phénomènes chimiques, électriques ou magnétiques. La science moderne, au XVIIème siècle voit apparaître une curiosité nouvelle envers la nature, et l'écho fait l'objet d'observations, de descriptions et de mesures. On commence alors à en chercher l'explication et l'analogie des propagations du son et de la lumière fournit une piste, soigneusement explorée. Au cours du XVIIIème siècle, on admet que le phénomène est plus complexe que prévu, et on tente d'appliquer les nouvelles méthodes mathématiques à la propagation des sons. Peu à peu la curiosité scientifique laisse la place à des préoccupations tendant plus à l'efficacité et l'acoustique abandonne, au cours du XIXème siècle, la recherche approfondie sur le phénomène de l'écho. Au XXème siècle, on revient sur son étude à l'occasion de l'invention de certains dispositifs commercialisés qui utilisent des procédés acoustiques, comme les installations de sonorisation, le sonar ou l'échographie.

Au-delà de l'explication du phénomène, la théorie de l'écho se trouve être un révélateur de la modélisation de la propagation des sons. En effet, quelques courants apparaissent à partir de la fin de la Renaissance, et souvent leurs différences et leurs fondements s'établissent à partir de l'interprétation de la réflexion des sons. Il est donc important de revenir aux théories anciennes pour bien comprendre le processus d'évolution de ces théories.

Le mythe d'Echo apparaît vers 400 av. J.-C. dans le prologue d'*Andromède* d'Euripide, mais c'est surtout Ovide qui en est le chantre dans les *Métamorphoses*. Il est arrivé aussi qu'Echo soit assimilée à l'air, chez le poète Ausone, et on l'invoque généralement pour mettre en fuite l'ennemi en poussant de grands cris. Selon Euripide, Echo, nymphe musicienne et chaste, est aimée de Pan qui, lassée de l'indifférence de la belle, déchaîne contre elle les bergers qui la mettent en pièces. C'est alors que la Terre recueille les dépouilles, les ensevelit et leur accorde la faculté de chanter et d'imiter les sons dans les bois. Pour Ovide, c'est plus complexe, Pan aime Echo qui ne l'aime pas mais qui aime Narcisse qui n'aime que lui-même... Et Echo, pressentie par Jupiter d'occuper Junon tandis qu'il poursuit les autres nymphes, sera punie par la reine des Dieux qui la condamne à devenir une personne « qui ne sait point parler la première, qui ne peut se taire quand on lui parle,

<sup>232</sup> Recueil des dissertations qui ont remporté le prix à l'Académie des Sciences de Bordeaux, tome 1, Brun, Bordeaux, 1719.

et qui répète seulement les derniers sons de la voix qu'elle entend »<sup>233</sup>. Comme dans beaucoup de mythes, la fonction pédagogique et morale est assurée... Cet extrait des *Métamorphoses* décrit la situation<sup>234</sup> :

[...] Écho, qui ne peut se taire quand les autres parlent, qui pourtant jamais ne parla la première, était alors une nymphe, et non une simple voix; et cependant dès lors, quoique nymphe causeuse, sa voix ne lui servait qu'à redire, comme aujourd'hui, les derniers mots qu'elle avait entendus. C'était un effet de la vengeance de Junon. Cette déesse aurait souvent surpris dans les montagnes son époux infidèle [Jupiter]; mais Écho l'arrêtait longtemps par ses discours, et donnait aux Nymphes le temps de s'échapper. La fille de Saturne ayant enfin connu cet artifice : "Cette langue qui m'a trompée perdra, dit-elle, de son pouvoir, et tu n'auras plus le libre usage de ta voix". L'effet suivit la menace, et depuis ce jour Écho ne peut que répéter le son et doubler la parole.

Une des fonctions des mythes est de fournir un cadre, à défaut d'explication, à de nombreux phénomènes naturels. Il ne faudrait pas pour autant négliger les apports scientifiques, peu nombreux et très insuffisants mais néanmoins présents, des philosophes de l'Antiquité, et bien entendu d'Aristote et de ses commentateurs. Un de ces apports est la problématique, non résolue mais bien posée, du mouvement du son.

## **Les deux approches de l'écho chez les Scolastiques**

Deux textes attribués tous deux à Aristote, le *Traité de l'âme* et le *De audibilibus*, dont l'auteur n'est pas Aristote, on le sait depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, mais sans doute son disciple Straton, forment le socle de la connaissance de la physique du son de l'Antiquité à la Renaissance. Le *Traité de l'âme* a été maintes fois traduit et commenté, le *De audibilibus* a été transmis sous forme d'un long fragment par Porphyre.

Pour résumer, la thèse défendue par Aristote dans le *De anima* consiste à définir le son comme une qualité, sans mouvement autre que celui des corps sonores lors de leur percussion qui meut l'air uni et continu jusqu'à l'oreille en un instant, comme la lumière. Cette thèse est reprise par les Scolastiques de tradition Thomiste.

Le *De audibilibus* propose une hypothèse basée sur une série de chocs de parties d'air transmis successivement entre le corps sonore et l'oreille. Cette théorie est défendue par Averroès, puis par de nombreux philosophes de la seconde Scolastique, à la fin de la Renaissance.

Ces deux approches, qualité successive et série de chocs de masses d'air contiguës, auxquelles on peut ajouter l'analogie avec les 'ronds dans l'eau' adoptée par tous, constituent la base des différentes théories de la propagation du son pendant plusieurs siècles, du fait de l'importance des écrits aristotéliens dans l'élaboration de la science au Moyen Âge.

## **Aristote et l'écho dans le traité de l'âme**

On sait que les sources des traductions des textes d'Aristote sont multiples, et les Scolastiques se sont surtout inspirés des commentaires de Thomas d'Aquin écrits à partir des traductions de Guillaume de Moerbeke, réputées être des traductions littérales. À côté de cette tradition, il en existe d'autres, dont celle qui apparaît au XV<sup>e</sup> siècle, avec l'arrivée en Italie de nombreux savants Byzantins. Parmi eux, on retient Argyropylus qui a traduit plusieurs textes d'Aristote à partir de copies grecques qu'on suppose parfois plus fiables que celles qui ont transité par l'Andalousie. Il n'est pas superflu d'analyser une phrase qui décrit le phénomène de l'écho dans le *De anima*, livre II, chapitre 8. Cette phrase a été reprise, commentée et interprétée par tous les Scolastiques qui se sont intéressés à la physique du son, et il en émane une certaine confusion.

Aristote semble embarrassé dans le traitement de la question de l'écho. La première phrase de ce paragraphe, selon Thomas d'Aquin, et donc d'après la traduction de Guillaume de Moerbeke, est :

Echon autem fit, cum ab aere uno fracto propter vas determinans et prohibens diffundi iterum aer repellitur sicut spera.

On retrouve cette traduction latine chez Sophianos (1564) et Zimara (1540), et en général dans toutes les traductions latines agréées du *De anima*.

Le texte grec d'origine semble être alors celui-ci :

<sup>233</sup> Ce passage est un résumé de l'article 'Echo' dans le *Dictionnaire des Antiquités grecques et latines*, Daremberg et Saglio, Hachette, Paris, 1877.

<sup>234</sup> Ovide, *Les métamorphoses*, III, 336-510. Trad. G.T. Villenave, Paris, 1806

ἡχώ δὲ γίνεται, ὅταν ἀπὸ τοῦ ἀέρος  
ἐνὸς γενομένου διὰ τὸ ἀγγεῖον τὸ διορίσαν καὶ κωλύσαν  
θρυφθῆναι πάλιν ὁ ἀήρ ἀπωσθῇ, ὥσπερ σφαῖρα.

σφαῖρα est traduit en latin par *sphaera* ou *spera*, ce qui semble logique et encourage l'interprétation et le commentaire, puisque les significations sont nombreuses, de 'sphère' à 'ballon'<sup>235</sup>. Argyropylus traduit par *pila* qui signifie clairement 'balle'. En revanche, la traduction littérale de ἀγγεῖον par *vas* limite la compréhension, car l'écho ne se produit pas dans un vase<sup>236</sup>. Il faut comprendre ce mot dans sa traduction de 'récipient', ou plus généralement par 'cavité' ou 'contenant', ce qui exprime plus clairement l'idée que l'air est confiné.

Yvan Pelletier, traducteur de Thomas d'Aquin, propose ceci :

L'écho, quant à lui, se produit lorsque l'air rebondit comme une sphère sur l'air gardé uni par la cavité qui le renferme et l'empêche de se dissiper.

Barthélémy Saint-Hilaire quant à lui, écrit en 1846 :

L'écho se produit, lorsque l'air est relancé de nouveau par le premier air qu'a réuni le vase qui le limite et l'empêche de se disperser, comme une balle est relancée.

Prévoyant la perplexité du lecteur, le traducteur précise en note :

'par le premier air qu'a réuni le vase qui le limite', c'est-à-dire : qui forme en quelque sorte un corps un et continu à cause des limites du vase dans lequel il est renfermé.

Il semble donc qu'il y ait deux airs qui se succèdent, l'air initial qui est confiné, et l'air qui rebondit. Quelques auteurs scolastiques parleront d'air intérieur et d'air extérieur<sup>237</sup>. Cependant on dit que l'air est un, et on dit aussi que le son est instantané, d'où vient alors ce délai entre le son direct et l'écho? Tout ceci n'est pas très clair.

Mais il y a plus troublant : le terme '*diffundi*' utilisé par Moerbeke, Sophianos et Zimara semble mal recopié, car plusieurs éditions d'origine orientale donnent '*dissolvi*'. C'est ainsi que l'édition d'Argyropylus (1500) retient :

Fit autem echo, sonitus inquam is qui post sonum resultat ; cum aer factus unus ob vas vel locum qui terminavit ipsum atque dissolvi prohibuit, inde resilit ut pila repulsus.

[Quant à l'écho, c'est le bruit qui rebondit après le son, il se fait quand l'air maintenu un, à cause d'un vase ou d'un lieu qui le délimite et l'empêche de se désunir (*dissolvi*), ressaute pour cette raison en arrière comme une balle qui rebondit.]

Le terme '*diffundi*' se traduit par 'se répandre' ou 's'étendre'. On comprend bien qu'il puisse s'appliquer au son, et ce verbe est d'ailleurs très souvent employé dans la littérature scientifique à propos du son. En revanche '*dissolvi*' introduit la notion de désunion, de séparation, parfois de dissolution. Et c'est bien ce qu'Aristote veut dire. A plusieurs reprises il insiste sur cette condition, nécessaire à la production du son, qui est, après le choc sonore et sa transmission à l'air, d'éviter l'émiettement de cet air, la séparation de ses parties, voire sa brisure et sa dispersion. Cette condition est réalisée lorsque l'air rencontre une certaine résistance à cette dispersion. L'émiettement a lieu lorsque l'air est totalement libre, c'est-à-dire lorsqu'il est en mouvement sans son, comme dans le cas du vent produit par un geste de la main. On comprend mieux l'explication de l'écho, qui est un son lui-même, car sa production est assurée par le caractère un et continu de l'air qui est limité dans sa dispersion par les parois du lieu. Selon la traduction d'Argyropylus, cet écho se produit après le premier son (*sonitus is qui post sonum resultat*). Ce qui confirme l'erreur de copie, probablement d'ailleurs après la traduction en latin, c'est le verbe *dissolvi* devenant *diffundi*, à partir du terme employé dans le texte grec, pourtant commun à ces traductions thomistes. Il s'agit de θρυφθῆναι qui signifie 'briser' ou 'broyer', ce qui explique très bien ce que voulait dire Aristote à propos de l'air qui est confiné pour ne pas être brisé dans son

<sup>235</sup> Suite à un problème technique, il n'a pas été possible de faire apparaître les accents et les esprits sur les caractères grecs utilisés dans cette partie du texte.

<sup>236</sup> Néanmoins on pourrait y voir une allusion aux vases acoustiques utilisés dans les théâtres grecs pour créer des résonances en utilisant la réverbération produite. Ces vases se nommaient d'ailleurs 'echéion'.

<sup>237</sup> Voir Scipion Dupleix, *La physique*, Paris, 1603, Rouen, 1640, Fayart, Paris, 1990, chap. XIV, de l'écho, p.465.

expansion. Toutefois, dans une édition de 1549 du *De anima* d'Aphrodise<sup>238</sup>, qui disposait sans doute d'une copie grecque fiable, on trouve '*neque dissolvitur diffunditurve*', ce qui montre sans doute la difficulté de traduire le verbe θρυφθηναί, en respectant à la fois le texte original et la science officielle.

La conséquence de cette traduction, approximative parce que littérale, utilisée par les Scolastiques, est que le phénomène de l'écho est très mal appréhendé, et même souvent masqué par des commentaires anecdotiques. Ce qu'on retrouve par exemple dans les encyclopédies médiévales telles que celle-ci<sup>239</sup> :

Pourquoy resonnent et rendent cris les lieux profonds et les caves ?

Ces lieux, par la reflexion en renvoyant le coup, rendent le son: car la voix frappe l'air et l'air le lieu, lequel de tant plus il est frappé, de tant rend il plus grand son. Mais les lieux humides, qui donnent lieu au coup et le resoudent, ne rendent point le son : mais selon la qualité et quantité du coup, se forme et exprime la qualité et quantité du son, qui se nomme Echo.

Cette description sommaire est suivie d'une longue anecdote sur le mythe d'Echo. L'explication est peu claire, mais la référence aux 'qualité et quantité' chères aux aristotéliens ferme toute objection.

Revenons au texte d'Aristote, dans le *Traité de l'âme*, sur l'écho. Après la définition de l'écho qui suscite cette analyse, Aristote poursuit en décrivant cette fois le phénomène de réverbération qui peut amplifier ou dégrader le son :

Il semble que l'écho se produise toujours, mais qu'il n'est pas toujours distinct, car il se passe pour le son ce qui se passe pour la lumière: en effet, la lumière est toujours réfléchie (sinon la lumière ne se diffuserait pas partout, mais l'obscurité régnerait en dehors des lieux éclairés par le Soleil), mais elle n'est pas toujours réfléchie d'une façon aussi parfaite que par l'eau, l'airain ou tout autre corps poli, de manière à produire dans tous les cas une ombre, caractère par lequel nous définissons communément la lumière.

L'explication est confuse et s'appuie sur une comparaison peu argumentée. Cette approche permettra aux nombreux commentateurs du *Traité de l'âme* d'être aussi évasifs et confus que le maître. Toutefois la comparaison avec la lumière est inévitable, tant la réflexion sur les miroirs est presque naturellement semblable à celle qu'on imagine pour le son. Cette comparaison induit de nombreuses approximations, et on retrouve par exemple dans plusieurs textes la condition nécessaire d'une surface dure et polie pour produire un écho.

## La position médiane d'Aphrodise

Cette position est inspirée de *De audibilibus*, mais plusieurs garanties sont prises afin de rester fidèle au *Traité de l'âme*. Elle est défendue par Alexandre d'Aphrodise (III<sup>e</sup> siècle), qui sera un des inspirateurs de Thomas d'Aquin. L'étude de l'écho est justement pour lui l'occasion d'aborder de façon différente la propagation du son<sup>240</sup>. En effet, Alexandre suggère que la 'forme' du son puisse être transmise lors de sa propagation et renvoyée sans altération lors d'un écho. Mais, restant alors dans le cadre du *Traité de l'âme*, il se garde bien d'invoquer un quelconque 'mouvement du son'. Alexandre insiste bien sur le caractère un et identique de l'air par cette expression bientôt consacrée : *aer unus idemque permanens*, qu'on retrouve chez tous les auteurs scolastiques parlant du son. Pour Alexandre d'Aphrodise, il n'y a pas de parties d'air, la notion viendra plus tard, mais une masse d'air une et continue, qui tremble lorsqu'elle est en contact avec, d'une part, un corps sonore et, d'autre part, l'organe de l'ouïe.

Alan Towey propose une traduction d'un extrait du *De anima* d'Aphrodise<sup>241</sup>:

Instead, the air which is struck to begin with might remain continuous and indivisible because of the speed of the blow. It would use the same sort of blow to impose a shape on the air next to it. This air might do the same to the air next to it, and in this way, because there is continuous air as far as the vessel, the sound would move forward by being passed on. The air adjacent to the vessel is the last air to be struck and receive the shape. Prevented from passing the blow any further because the vessel is in the way, it would be pushed back by the resistance of the

<sup>238</sup> Alexandre d'Aphrodise, *Questiones naturales et morales, Alexandri de anima*, lib. Primus, trad. H.-D. Paricio, Venise, 1549, p. 41.

<sup>239</sup> *Problemes d'Aristote et autres filozophes et medecins selon la composition du corps humain avec ceux de Marc Antoine Zimara, sus plusieurs questions physiques*, trad. de Georges de La Bouthière, Lyon, Jan de Tournes, 1554, chap. 133, p. 252.

<sup>240</sup> Le traitement du sujet de l'écho par les Anciens fait l'objet de la fin du chapitre consacré à l'étude des phénomènes sonores dans l'antiquité (1<sup>ère</sup> partie, chapitre 6).

<sup>241</sup> Alan Towey, 'Aristotle and Alexander on hearing and instantaneous change : A dilemma in Aristotle's account of hearing', in '*The second sense, studies in hearing and musical judgement from antiquity to the seventeenth century*', Warburg Institute, Univ. of London, 1991, p. 14.

solid body, just as a ball bounces off a solid body, and would strike the air behind it and re-impose the shape. This air would do the same to the air next to it, and in this way the passing on of the blow and the sound would reach its starting point, just like seeing people in mirrors.

### L'écho dans le Commentaire au Traité de l'âme d'Averroès

Chez les savants arabes, lecteurs et commentateurs d'Aristote, Averroès, est sur une position qui se revendique également du *De audibilibus*, mais il reprend l'analogie des ronds dans l'eau, et a peut-être contribué à la faire connaître à Thomas d'Aquin. Il explique l'écho par une représentation assez moderne : la partie d'air en mouvement, confinée et empêchée de sortir de la cavité, percute une paroi réfléchissante et cette percussion met en mouvement une autre partie d'air qui revient en arrière puisque, le son se propageant en cercles, cette partie ne peut pas se déplacer vers la paroi. Et donc un second son se forme, à l'image du premier.

rit (echo aut est ac). i. echo fit ex aere qui fit vnus idest terminatus et inclusus ppter illud a quo continetur et prohibetur ab exitu: quoniam cum motus eius a primo percutiente perficitur aer a lateribus eius a quo continetur: et percutit ipsum secundam percussione simili prime percussioni que fecit sonum et sic auditur idem sonus iteratus ei quasi respondens primo: et assimilavit istud ipse corpus: qm quando sphaera expellitur contingit in ea motus similis primo motui: et echo auditur post primum sonum quasi ridens qd: unde declaratum est qd inter eos duos motus est quies. Et non est intelligendum ex hoc qd vi

Echo fit ex aere qui fit vnus idest terminatus et inclusus propter illud a quo continetur et prohibetur ab exitu : quoniam cum motus ejus a primo percutiente perficitur aer a lateribus ejus a quo continetur : et percutit ipsum secunda percussione simili prime percussioni quae fecit sonum et sic auditur idem sonus iteratus ei quasi respondens primo : et assimilavit istud sphaerae expulsa : quam [?] quando sphaera expellitur contingit in ea motus similis primo motui: et echo auditur post primum sonum quasi evidens quoniam declaratum est quod inter eos duos motus est quies.

[L'écho est produit par l'air maintenu un, c'est-à-dire borné et enfermé en contact avec ce qui le maintient et l'empêche de sortir, après que lorsque le mouvement de l'air dû à la première percussion est achevé du fait des parois qui maintiennent l'air, et qu'il le frappe d'une seconde percussion semblable à la première qui fait le son, et qu'ainsi le même son répété est entendu, répondant pour ainsi dire à ce premier. Et il [Aristote] le compare à une balle lancée, à savoir[?] quand la balle est lancée, elle arrive par un mouvement similaire au premier mouvement. L'écho est entendu après le premier son, c'est presque évident puisqu'on a déclaré qu'entre deux mouvements il y a un repos.]

Le commentaire d'Averroès éclaire le propos d'Aristote par la décomposition du mouvement de l'air qu'il décrit. L'écho est formé d'une succession de deux percussions distinctes de l'air produisant deux sons semblables, et séparées par un temps de repos qui justifie le retard, puisque le son est instantané dans sa propagation, selon Aristote.

L'air est bien entendu maintenu en une masse unique mais on note l'emploi du terme mouvement à plusieurs reprises, ce qui constitue une évolution importante de l'approche aristotélicienne.

### Le commentaire de Thomas d'Aquin

Cependant la source principale des savants scolastiques reste Thomas d'Aquin, et, en ce qui concerne le son et ses effets, le *Commentaire au Traité de l'âme*. L'étude du son exposée par le Dominicain est composée des leçons 16 et 17.

Thomas décrit dans un premier lieu ce qu'on nommera par la suite la résonance ou la réverbération :

444. Par ailleurs, les objets creux aussi, quand on les frappe, rendent bien le son, parce qu'ils renferment de l'air à l'intérieur d'eux. Comme ce qui est mû en premier ne peut pas sortir tout de suite, il frappe un autre air, et ainsi par répercussion il se fait plusieurs coups et le son s'en trouve multiplié.

Le passage traitant de l'écho est au paragraphe 447 :

447. Ensuite (419b25), il traite de la seconde production du son, qui se fait par réverbération, lequel son on appelle *écho*. En premier, donc, il décrit comment il est produit; en second (419b27), il montre la différence de sa production. Sur le premier point, on doit tenir

compte de ce que la production du son dans l'air suit le mouvement de l'air, comme on a dit (445-446). D'ailleurs, il peut en aller de l'affection de l'air, lors de la production du son, comme de l'affection de l'eau, quand une chose y est projetée. Manifestement, en effet, il se produit des ronds autour de l'eau frappée. Ceux-ci, près du lieu du coup, sont petits, et le mouvement est fort. Mais plus loin, les ronds sont grands, et le mouvement plus faible. Enfin, le mouvement s'évanouit totalement, et les ronds disparaissent. Si toutefois, avant que le mouvement ne cesse, les ronds rencontrent un obstacle, il se forme des ronds en sens contraire; et cela avec d'autant plus de véhémence qu'on est plus près du premier choc.[...]

449. Cela se fait principalement, quand ce qui fait obstacle à la répercussion de l'air mû est un corps concave, comme un vase qui limiterait l'air et lui garderait son unité, l'empêchant ainsi de se diviser. Alors, en effet, cet air ainsi déplacé et gardé un, comme il ne peut étendre son mouvement plus loin, en raison du corps qui lui fait obstacle, frappe de nouveau l'air qui le frappait et le mouvement repart en sens contraire. C'est ce qu'il arrive quand on lance une balle, appelée ici une sphère, et que, rencontrant un obstacle, elle rejaillit.

Les paragraphes 444 à 446 en référence exposent la théorie d'Aristote sur le rôle de l'air dans la propagation des sons. Devant la difficulté de décrypter le texte d'Aristote tel qu'il en disposait, Thomas d'Aquin introduit alors l'analogie des ronds dans l'eau, qu'il a sans doute lue chez les Stoïciens ou dans Vitruve, mais également chez Averroès qu'il critique pourtant à plusieurs reprises. Et en effet, cette analogie permet une représentation simple et efficace du phénomène, même si son fonctionnement demeure obscur à cette époque. Elle permet de plus l'introduction de la notion de mouvement, même si on ne sait pas encore bien ce qui se déplace.

En raison de l'influence de Thomas d'Aquin sur la science du Moyen âge et de la Renaissance, la théorie de la masse d'air *unus et idem permanens* qui propage le son instantanément, agrémentée de l'analogie des ronds dans l'eau sera la théorie dominante. Cependant l'instantanéité du son et la négation du mouvement ne peuvent plus convenir à des philosophes savants qui observent de plus en plus les phénomènes de la nature.

### **L'écho vu par un jésuite de la seconde tradition scolastique, Francisco Suarez**

Plus tard, les Scolastiques de la seconde époque, et en particulier Francisco Suarez, reprennent l'analogie des ronds dans l'eau, en l'opposant à la théorie du *De audibilibus* :

[...] Et in hoc omnes interpretes conveniunt, sed dubitant de modo quo ista reflexio fit. Et quidam aiunt quod una pars numero aeris percussus pervenit usque ad corpus solidum, et eadem reflectitur, sicut pila, et ideo causat eundem sonum. Ita Avicenna, 6 Naturalium. Sed hic modus est impossibilis, quia in aere non est una pars numero quae moveatur et deferat sonum. Alii dicunt reflexionem fieri isto modo: Quod aer per vocem movetur quasi in circulum, et una pars comprimit aliam, vel commovet aliam, imprimendo illi similem sonum, et sic moventur donec finiatur vis impulsus, vel inveniatur obstaculum, quo invento, reflectuntur illae undae aeris, servata eadem forma soni, sicut si lapis proiciatur in aquam paludis, aqua movetur in gyrum, invento autem obstaculo, undae revertuntur versus lapidem ordine retrogrado. Ita Philoponus, f 60, col 3, Albertus, tract 3, cap 19, D Thomas, Commentator, Aegidius et alii, hic, tx 78 et 80.

[Et dans cette matière, tous les traducteurs sont d'accord, mais s'interrogent sur la façon dont se fait cette réflexion. Certains affirment qu'une partie précisément [*numero*] de l'air percuté parvient sur un corps solide et que cette même partie est renvoyée comme une balle, et pour cette raison, cause le même son (Avicenne, *Naturales*, VI). Mais ce mode est impossible, parce que dans l'air il n'y a pas précisément une partie qui se déplacerait et porterait le son. D'autres disent que la réflexion se fait de cette façon : parce que l'air est mis en mouvement par la voix, pour ainsi dire en cercle, et une partie comprime l'autre, ou met en mouvement l'autre, en lui laissant comme empreinte le même son, et ainsi ils sont en mouvement jusqu'à ce que la force de l'impulsion cesse, ou qu'elle tombe sur un obstacle, sur lequel ces ondulations de l'air se réfléchissent, la même forme du son étant préservée, de la même façon que si une pierre est projetée dans l'eau d'un étang, l'eau se déplace en cercles, mais, ayant rencontré un obstacle, les ondes reviennent en direction de la pierre en sens inverse.]

Suarez met ici en évidence les deux interprétations de la théorie d'Aristote. La première, développée à partir du *De audibilibus*, met en jeu des parties d'air qui communiquent de proche en proche l'information sonore. Et dans le cas de l'écho, la partie immédiatement à proximité de l'obstacle réfléchissant ne peut pas communiquer son tremblement au corps dur, et donc le communique à la partie précédente, assurant ainsi le retour en arrière du son, et donc la réflexion. Cependant Suarez conteste cette approche en niant simplement l'existence de 'parties d'air'.

La seconde interprétation développée et adoptée par Suarez demeure fidèle à l'Aristote du *Traité de l'âme*, est celle de Thomas d'Aquin. Il affirme la continuité de l'air, refusant donc sa partition. Cette position est la conséquence du refus d'Aristote d'attribuer un mouvement local au son. Le son est produit par un choc, il se

communiqué à l'air, et est immédiatement perçu. Le son est une perception avant tout, et non un phénomène physique. Cette attitude est elle-même la conséquence de la définition aristotélicienne du mouvement qui ne peut être qu'un transport de matière. Or il ne peut pas être question d'une matérialité du son qui impliquerait une nature corpusculaire incompatible avec l'anti-atomisme d'Aristote et des Scolastiques. C'est pourquoi, donc, le son ne peut être qu'une 'qualité' perçue par l'ouïe et propagée par un tremblement de l'air maintenu en une seule masse et continu (*aer unus et continuus*). Et c'est ainsi que l'analogie avec les ronds dans l'eau, empruntée aux Stoïciens, vient au secours des aristotéliciens. L'eau est une, et ses déformations à la surface ne se communiquent pas d'une partie d'eau à une autre, mais se propagent au loin en cercles, en conservant l'unicité de la matière. Il faut pourtant prendre garde de ne pas faire de confusion anachronique, il ne s'agit pas d'ondes au sens moderne, ce qui supposerait une théorie du mouvement vibratoire et ce n'est pas le cas. Il s'agit uniquement d'une représentation destinée avant tout à se prémunir d'une part de la théorie corpusculaire, et d'autre part à contester la théorie des parties d'air qui pourrait y ressembler par certains aspects.

A partir de la Renaissance, on dispose de deux approches, toutes deux aristotéliciennes, mais profondément différentes. Et on raconte encore nombre d'anecdotes, comme celle de Cardan, qui, après cette courte introduction, nous conte l'histoire d'un écho dont la réponse crée un quiproquo<sup>242</sup> :

Echo quid sit.

Tertium vigiliæ genus purum est ac syncerum, in quo tamen multis modis mira videre contingit; velut cùm echo resonat, tum maximè multiplex contingit, vt quandoque septies voces reddat. Noctu id mirum in modum, et nisi vulgata res esset, quemcunque posset perterrefacere, adeò voces perspicuas ac tardè quandoque reddit. Causa est aër, qui à planis repercutitur, cauisque: non enim nisi antra sint aut muri resonat: resonat autem ex vetustis, et magis procul quàm propè. Elidi vocem in echo necesse est, ac plano intermedio referri. Et sublimi loco, et directo melius redditur.

L'écho peut travestir la voix, ainsi que l'illustre cette anecdote. Cardan raconte qu'un ami, passant de nuit près d'une rivière dangereuse et ne trouvant pas le gué, cria '*debo passa qui ?*' (dois-je passer ici ?) et l'écho lui répondit d'une voix aigue '*passa qui*' (passe ici), puis '*qui*' (ici). Il semble que l'ami, prudent et avisé, ne suivit pas l'indication fournie par l'écho.

Mais on raconte encore mille histoires et exemples extraordinaires d'échos dans des cavernes (l'oreille de Denys à Syracuse), dans les vallées encaissées (près de Coblenze, un écho répète dix-sept fois), dans des cours de grandes demeures (à Mantoue), ou sous les ponts (à Charenton).

## Résumé des théories scolastiques de l'écho

Outre la mise en évidence de cette propriété de réflexion, l'écho est surtout, pour certains philosophes, la manifestation de la nature matérielle du mouvement du son qui, et ceci en est la preuve, prend du temps à se propager. Cette approche n'est pas toujours acceptée, et notamment par Aristote et par la science médiévale et scolastique, qui considéraient que le son se propage instantanément, puisque c'est un 'mouvement de qualité' perçu dès qu'il est produit par le choc. La réflexion du son fait partie de ces phénomènes mystérieux sur lesquels on s'attarde peu, sauf pour en conter les nombreuses anecdotes et légendes. Aristote est discret, il parle de rebondissement de l'air puis compare avec la lumière. Alexandre d'Aphrodise évoque une propagation de proche en proche des parties d'air porteuses de la forme du son, jusqu'à sa réflexion. Thomas d'Aquin invoque l'analogie des ronds dans l'eau. Averroès et Avicenne rejoignent la position d'Alexandre. Les Scolastiques de la seconde période se partagent, mais la position aristotélicienne devient de plus en plus difficile à défendre.

## L'approche expérimentale de l'écho aux débuts de la Science Moderne

L'écho a peu été abordé par les Anciens, sauf sous sa dimension anecdotique et mythologique. Tout au plus Aristote indique que l'écho renvoie l'air comme une balle et qu'il se produit de la même façon que la lumière, c'est-à-dire en permanence, et sur tous les corps rencontrés par l'air frappé par le choc sonore<sup>243</sup>. Le *De audibilibus* n'évoque pas le sujet dans la version sans doute incomplète qui nous est parvenue, et on a quelques allusions dans les *Problemata*, section XI. Les savants du début du XVII<sup>e</sup> siècle avaient bien entendu lu ce texte, et notamment le problème 23<sup>244</sup> :

<sup>242</sup> Jérôme Cardan, *De subtilitate*, Lyon, 1550 : liber XVIII, De mirabilibus et modo repraesentandi res varias praeter fidem, p.678.

<sup>243</sup> Aristote, *De anima*, livre II, chap. 8.

<sup>244</sup> Ps. Aristote, *Problemata*, trad. Pierre Louis, Paris, Les Belles Lettres, 1993, section XI, problème 23. On notera l'usage anachronique du terme 'diffraction'.



Pourquoi, si la voix est de l'air qui a pris une certaine forme et qui se déplace, cette forme éclate-t-elle souvent, alors que l'écho, qui se produit quand l'air en cette situation vient frapper un corps solide, ne se diffuse pas, lui, mais est perçu par nous distinctement ? Est-ce parce qu'il s'agit d'une réflexion et non d'une 'diffraction' ? Ainsi le son se maintient et il en sort deux fractions de forme identique. Car la réflexion a lieu sous le même angle, et c'est pourquoi la voix répercutée par l'écho est identique à la voix originale.

Dans cet extrait, la phrase importante est la dernière, qui évoque l'idée de l'égalité entre l'angle d'incidence et l'angle de réflexion en permettant la conservation des qualités de la voix réfléchi. C'est en tous cas l'interprétation qui en est faite par les savants aristotéliens de l'époque moderne, et en particulier par les savants jésuites qui citent ce texte. Cependant l'hypothèse des rayons sonores ne convient pas à tous les philosophes qui de plus en plus entreprennent des observations et des expériences.

L'écho, par ses nombreuses propriétés et surtout par sa reproductibilité lorsque le site est favorable, permet une étude expérimentale de la propagation des sons. Les savants expérimentateurs du début du XVII<sup>ème</sup> siècle s'investissent alors dans l'observation de l'écho, dans le but de comprendre le son.

## Les observations de Francis Bacon

Au début du XVII<sup>ème</sup> siècle, Francis Bacon écrit une *Historia soni et auditus* qui ne sera jamais éditée et qui lui servira de matériau pour écrire les deux longs chapitres consacrés aux sons dans le *Sylva sylvarum* écrit en anglais et publié juste après sa mort, en 1626. Bacon y développe une curieuse théorie qui consiste à nier tout mouvement local de l'air lors de la propagation du son. Il recyclera ce passage sans *Sylva sylvarum*, transformant à cette occasion l'argument contre le mouvement local de l'air en réfutation de la nature matérielle du son<sup>245</sup> :

Repercussio sonorum (quam echo vocamus) in argumentum sumi potest, non esse sonum motum localem aeris. Nam si esset, debuerat repercussio fieri in modo consimili ad originale; ut fit in omnibus repercussionibus corporeis. At in sono cum tam accurata requiratur generatio, ut in voce, quae tot habet instrumenta, et is instrumentis musicis quae subtiliter fabricata sunt, ea quae reddunt sonum repercussum nihil horum habent, sed rudia plane sunt, et illud fere habent ut sonus non transeat, vix aliud quippiam.

La répercussion des sons (que nous nommons 'écho') peut servir à argumenter que le son n'est pas un mouvement local de l'air. Car s'il l'était, la répercussion devrait se faire sur un mode tout à fait semblable à l'original, comme elle se fait pour toutes les répercussions des corps. Or dans le son, puisque sa génération requiert tellement de soin, comme dans la voix qui renferme tant d'instruments, et plus encore dans les instruments de musique qui sont fabriqués avec précision, les dispositifs qui rendent le son réfléchi n'ont rien de ceci, mais sont clairement à l'état brut, et sont le plus souvent de telle sorte que le son ne se transforme pas, ou à peine.

Bacon a ici une idée originale, il envisage que le son de l'écho requiert pour sa génération les mêmes dispositifs que le son original. En fait, en niant le mouvement du son, il réfute l'idée que l'écho soit lui-même un son, puisqu'il ne dispose pas des conditions matérielles de sa production. Il faut donc comprendre que l'écho n'a pas d'existence matérielle, mais est une image qui est perçue par l'ouïe dans des conditions particulières, un peu comme on pourrait l'envisager pour les images renvoyées par un miroir qui de ce fait ne sont pas réelles. Et dans *Sylva sylvarum*, Bacon utilise la même argumentation, tout à la fin de l'ouvrage, pour réfuter la matérialité du son et affirmer son essence spirituelle<sup>246</sup> :

The repercussion of sounds (which we call echo) is a great argument of the spiritual essence of sounds. For if it were corporeal, the repercussion should be created in the same manner, and by like instruments, with the original sound; but we see what number of exquisite instruments must concur in speaking of words, wherof there is no such matter in the returning of them; but only a plain stop and repercussion.

Voici la traduction de Lasalle, au début du XIX<sup>ème</sup> siècle<sup>247</sup> :

[Je ne connais point de preuve plus forte de la nature immatérielle des sons, que leur répercussion (réflexion), d'où résulte ce qu'on appelle un écho. Car, si cette nature était corporelle, la génération du son secondaire ou réfléchi serait, et quant à la manière et quant à l'instrument, tout à fait semblable à celle du son originel et primitif : Cependant nous voyons que la prononciation des mots exige un appareil très compliqué d'instruments de différentes formes, et d'une structure fort délicate; au lieu que la répercussion des sons n'exige rien de semblable, mais seulement un corps quelconque qui puisse les réfléchir.]

<sup>245</sup> Francis Bacon, *Historia soni et auditus*, ed. Spedding, London, 1859, vol.III, p.673.

<sup>246</sup> Francis Bacon, *Sylva sylvarum*, 1627, ed. Spedding, London, 1859, vol II, century 3, 287, p.435.

<sup>247</sup> *Idem*, traduction Antoine Lasalle, Frantin, Dijon, 1803.

Tout ceci est curieux et ne correspond pas à la description que fait Francis Bacon de la réflexion des sons ni à son approche de la physique des sons. Alors, peut-être est-ce une pirouette ironique, sorte de démonstration par l'absurde, envers les Scolastiques, pour montrer à quel point leur approche strictement perceptive est inacceptable? Ou alors une prévention contre les éventuelles attaques envers son atomisme supposé? Quoi qu'il en soit, Francis Bacon écrit longuement sur la réflexion des sons, ce qui lui permet d'avancer quelques idées sur la propagation sonore.

L'inévitable analogie avec la lumière se réfléchissant sur un miroir est ici évoquée, mais c'est pour la nuancer, et Bacon est perspicace dans cette démarche originale qui ne sera pas reprise par nombre de ses successeurs qui préféreront la facilité de l'analogie<sup>248</sup> :

The reflexion of species visible, by mirrors, you may command, because passing in right lines, they may be guided to any point. But the reflexion of sounds is hard to master, because the sound filling great spaces in arched lines, cannot be so guided, and therefore we see that hath not been practised any means to make artificial echoes. And no echo already known returneth in a very narrow room.

[On peut imposer la réflexion des 'espèces visibles' par des miroirs, car, se propageant en lignes droites, elles peuvent être dirigées en n'importe quel point. Mais on dispose difficilement de la réflexion des sons, car le son remplissant de grands espaces par des lignes courbes, ne peut pas être ainsi dirigé, et c'est pourquoi on n'a entendu parler d'aucun moyen de réaliser des échos artificiels. De même aucun écho, à notre connaissance, ne s'est déjà produit dans une pièce fort étroite.]

Le silence au sujet de l'écho dans les études traitant du son pendant longtemps est le signe d'une grande perplexité sur la nature réelle des réflexions sonores. En effet, Bacon a ici l'intuition d'un concept moderne, celui de 'champ sonore', par opposition à celui de 'rayon sonore' qui connaît un grand succès auprès des savants de cette époque. On sait comment cette modélisation s'est ancrée dans la représentation des sons à partir de considérations pas toujours scientifiques<sup>249</sup>.

Sur l'écho, Bacon distingue avec beaucoup de perspicacité deux types de réflexions<sup>250</sup> :

There be two kinds of reflexion of sounds : the one at distance, which is the echo, wherein the original is heard distinctly and the reflexion also distinctly [...] The other in concurrence, when the sound reflecting (the reflexion being near at hand) returneth immediately upon the original, and so iterateth it not, but amplifieth it.

[Il existe deux types de réflexion du son : l'un à distance, c'est l'écho, dans lequel le son original est entendu distinctement, et le son réfléchi également distinctement. L'autre est en convergence [in concurrence], la réflexion est alors très proche, quand le son qui se réfléchit retourne immédiatement sur l'original sans provoquer de répétition mais une amplification.]

Cette hypothèse basée sur l'observation est audacieuse. Elle ne sera d'ailleurs reprise que bien plus tard par les physiciens<sup>251</sup>. Jusqu'alors le phénomène de l'écho, pourtant fréquent, ne faisait l'objet que de descriptions, et on se contentait de l'expliquer par le modèle du rebondissement d'une balle sur un mur, le modèle proposé par Aristote. L'introduction de la réflexion convergente (*in concurrence*) explique le phénomène d'amplification observé dans les caisses de résonance où l'air est confiné. Ce type de réflexion produit également le phénomène de réverbération, où les obstacles réfléchissants sont trop proches pour produire un écho distinct, et où le nombre de répétitions convergentes génère une confusion des sons.

Bacon revient longuement sur la réflexion du son dans le Century III (ou partie III) et lui consacre un chapitre entier qui traite de l'écho<sup>252</sup>. Après la réflexion convergente, il décrit l'écho qu'il nomme itératif (*iterant*), pour en souligner le caractère de répétition. A ces deux types il en ajoute un troisième qui est la 'réflexion de réflexion', sans doute pour fournir une explication aux échos multiples, mais sans vraiment de nécessité.

La réfutation par Bacon de la théorie traditionnelle et l'introduction de la notion de mouvement lui permet d'aborder sans crainte l'observation et l'explication des phénomènes de réflexion du son et la notion de vitesse apparaît :

<sup>248</sup> *Idem*, 242, p.425. Trad. Lasalle.

<sup>249</sup> Voir, dans le chapitre concernant l'analogie entre son et lumière, le rôle joué par les Jésuites dans l'exploitation et la diffusion de cette modélisation.

<sup>250</sup> *id.* 144, p. 399.

<sup>251</sup> Claude Perrault reprendra cette hypothèse dans son *Traité du Bruit* paru en 1684.

<sup>252</sup> Francis Bacon, *Sylva sylvarum*, 1627, ed. Spedding, London, 1859, vol II, p.425-428, *Experiments in consort touching the reflexion of sounds*.

There is no difference between the concurrent echo and the iterant, but the quickness or slowness of the return.

Bien entendu, pour Bacon qui n'est pas vraiment physicien, la notion de vitesse se confond ici avec celle de durée, et l'affirmation selon laquelle la différence entre réverbération et écho se manifeste par la vitesse du retour est significative de cette confusion.

En revanche, Francis Bacon réalise des expériences, dont celle-ci <sup>253</sup>:

Nous avons dit, dans un des n<sup>os</sup>. précédents, que, si l'on parle, en appliquant sa bouche à l'extrémité d'un tuyau fermé à son autre extrémité, le retour du souffle se fait sentir à la bouche, mais qu'alors on n'entend point de son (réfléchi). Ce qui vient de ce que cette propriété qu'a un tuyau, une cavité quelconque, de conserver le son originel, ne suffit pas pour conserver (pour faire entendre) le son réfléchi, sans compter qu'il ne peut y avoir d'écho si le son n'a une certaine force et une certaine netteté; ce qui semble ôter toute espérance de pouvoir produire un écho artificiel en comprimant l'air dans une concavité étroite. Cependant on s'est assuré que, si une personne s'appuyant sur le bord d'un puits de vingt-cinq brasses de profondeur, parle un peu bas; pas si bas toutefois qu'il n'en résulte qu'un chuchotement, la surface de l'eau produit alors un écho assez sensible et assez distinct. Il faudrait, de plus, s'assurer si, en parlant à l'orifice de ces cavités où la voix ne peut revenir que par l'ouverture même d'où elle est partie, on aurait un écho comme dans ce puits.

En effet, Bacon, ainsi que d'autres observateurs, avait constaté la nécessité d'une canalisation du son sur une certaine longueur pour obtenir un écho, ceci afin d'éviter l'atténuation de l'intensité avec la distance. Cependant, le cas présenté est un cas limite, dans lequel la réflexion du son ne renvoie que le souffle mais pas de son, sans doute parce que la bouche recouvre complètement l'orifice, créant ainsi une surpression <sup>254</sup>. Bacon avait d'ailleurs envisagé cette possibilité, puisque plus loin il dit :

Il faut aussi que l'air qui transmet et les sons directs et les sons réfléchis, ne soit pas trop resserré [comprimé] ; car un air resserré, dans les cas des grandes distances, produit le même effet que les petites distances dans les cas où l'air est libre. Aussi lorsqu'on parle à l'ouverture d'un puits, même très profond, la voix revient-elle aussitôt, et l'écho ne répète-t-il que deux syllabes.

Alors que Bacon identifie bien l'influence de la compression (resserrement de l'air), il ne l'applique pas à son expérience précédente, mais semble attribuer à ce paramètre la brièveté de l'intervalle d'écho dans le cas du puits. Il est probable que la profondeur était insuffisante (un écho d'une seconde équivaut à une profondeur de 170 m...). En effet, Francis Bacon confond à l'occasion vitesse et durée, ou même distance... Après un certain nombre de descriptions ordinaires d'échos extraordinaires, Francis Bacon évoque pour l'écarter la possibilité de réfraction du son lors d'un changement de milieu.

Bacon s'intéresse également à la directivité de l'écho, et il pose le problème important de l'analogie avec la lumière se réfléchissant dans un miroir, selon laquelle on déclarerait que l'écho se réfléchirait selon des 'rayons sonores' <sup>255</sup> :

L'écho, ainsi que le son originel, se propage circulairement dans l'air (selon tous les rayons de la sphère dont le corps sonore occupe le centre). Mais il faudrait faire quelques observations pour savoir si la répercussion du son par un corps qui ferait un angle, par exemple, par cette partie d'un mur qui se trouve près de son angle rentrant, produirait un écho; comme dans cette réflexion qui est l'effet d'un miroir, l'angle d'incidence formé par un rayon qui va de l'objet au miroir, et l'angle de réflexion, formé par le rayon qui vient de ce même point de la glace à l'œil, sont parfaitement égaux; ou comme une balle qui frappe un mur obliquement, ou qu'une raquette frappe de cette manière, fait son angle de réflexion à peu près égal à l'angle d'incidence ou de percussion. Ainsi, il faudrait voir si cette circonstance suffirait pour produire un écho ; je veux dire, si une personne placée latéralement, ou dans la ligne du son réfléchi, entendrait mieux la voix qu'en se plaçant aux différents points d'une ligne située entre cette dernière et celle du son direct. Il faudrait aussi se tenir alternativement tantôt plus près, tantôt plus loin du point où se fait la répercussion, que la personne qui parle, afin de voir si les échos sont, ainsi que les sons originels, plus forts quand on est plus près de l'endroit où ils se forment.

Cette problématique va se révéler bientôt et plusieurs savants n'hésiteront pas à manipuler ces 'rayons sonores' de la même façon qu'on le fait dans la catoptrique.

<sup>253</sup> *Id.* p. 425.

<sup>254</sup> L'explication est que l'augmentation de pression de l'air due à l'émission sonore dans un tube fermé et occulté par la bouche du locuteur, neutralise les variations de pression constituant le son. Dans un puits, l'orifice n'étant pas entièrement fermé par la bouche du locuteur, la pression reste égale à la pression ambiante de l'air, l'écho peut donc se produire. Bacon semble attribuer l'écho à la surface de l'eau, ce qui est inexact.

<sup>255</sup> *Id.*

Francis Bacon a produit un travail d'observation encore jamais effectué sur la propagation des sons, ses lacunes en mathématiques et en physique l'ont sans doute contraint de se limiter à des propositions d'expériences. Son ami Marin Mersenne va poursuivre quelques années plus tard cette œuvre novatrice d'invention de la physique des sons.

### La physique simple de Scipion Dupleix

Les germes de la science moderne apparaissent d'abord sous forme d'observations, parfois naïves mais qui peuvent se révéler importantes. C'est le cas par exemple du chapitre sur l'écho dans *La Physique* de Scipion Dupleix, un ouvrage qui ne prétend pas à la découverte, mais un livre de vulgarisation qui fut réédité de nombreuses fois, de 1603 à 1641. Ici, le temps de propagation du son est occulté, même à propos de l'écho<sup>256</sup> :

[l'écho] se fait par la sympathie de l'air extérieur et intérieur. Car l'air extérieur agité et battu du son et bruit venant à battre contre les corps creux et caveux, communique ses affections et impressions à l'air qui est au dedans, de manière qu'il en résonne et retentit de même. Or d'autant plus qu'il y a de creux et de détours dans une même caverne, d'autant plus de voix sont rapportées par l'Echo.

Comme chez les autres auteurs, on élude le problème par des énumérations anecdotiques d'échos singuliers, longuement décrits et commentés. Sur les trois pages du chapitre, deux sont consacrées à des anecdotes ou à des descriptions d'échos rapportées par Plutarque, Pausanias, Lucrèce et Cardan.

Toutefois l'auteur met en évidence une caractéristique importante de la production d'un écho, c'est la présence presque toujours constatée de cavernes ou de 'couloirs' situés sur le trajet du son réfléchi<sup>257</sup>.

### Giuseppe Biancani dans *Echometria, idest Geometrica tractatio de Echo*

Dès la fin du XVI<sup>e</sup> siècle, on mesure l'écho par le nombre de syllabes qu'il répète, on dit alors qu'il est polysyllabique. Mais il peut être simple ou polyphone lorsqu'il répète plusieurs fois. La première caractéristique, le nombre de syllabes répétées, introduit la notion d'intervalle de temps, donc en inversant les références, de distance parcourue par le son en un temps donné. La seconde pourrait suggérer qu'il existe plusieurs lieux de réflexion du son. Ces méthodes de mesure sont empiriques, elles sont issues de l'observation et non de la mathématisation galiléenne.

Le premier philosophe ayant étudié l'écho de façon mathématique, à partir d'observations et de conjectures, mais sans beaucoup de vérifications expérimentales, est Giuseppe Biancani (1566-1624), mathématicien jésuite et astronome de Bologne, contemporain et volontiers admirateur de Galilée. Il écrit vers 1615 un vaste traité de géographie, de cosmographie et de mathématiques intitulé *Sphaera Mundi* qui ne sera publié qu'en 1620. La troisième partie, une quinzaine de pages, a pour titre '*Echometria, idest Geometrica tractatio de Echo*'.

La démarche de Biancani est donc essentiellement géométrique, et ce qui l'intéresse dans l'étude de la réflexion des sons, c'est avant tout l'étude des trajectoires des 'rayons sonores'<sup>258</sup>. Son exposé est un véritable cours de géométrie, avec définitions, figures, théorèmes et démonstrations<sup>259</sup> :

<sup>256</sup> Scipion Dupleix, *La physique*, Paris, 1603, Rouen, 1640, Fayart, Paris, 1990, chap. XIV, p.465.

<sup>257</sup> Cette 'canalisation' du son réfléchi est nécessaire pour produire un écho audible, car elle limite l'atténuation proportionnelle au carré de la distance observée dans le cas d'une diffusion sphérique. Le son s'atténuant peu, il conserve une intensité qui lui permet d'être entendu à une distance importante. Bien entendu cette remarque ne pouvait pas être faite en ce début du XVII<sup>e</sup> siècle. On peut expliquer cette propriété par analogie entre l'intensité sonore et la pression (en effet, on peut considérer le son comme une variation de pression) : pour une énergie initiale donnée, la pression est inversement proportionnelle à la surface sur laquelle elle est appliquée.

<sup>258</sup> L'analogie entre les propagations des sons et de la lumière est traitée dans une autre partie consacrée à ce sujet. Le travail de Biancani y est exposé selon ce point de vue.

<sup>259</sup> Giuseppe Biancani, *Sphaera mundi, seu cosmographia...*, Bologne, 1620, p. 219.

## D E F I N I T I O N E S.

**P**rima erit ipsius nominis definitio, seu Etymologia. Echo Græcè dicitur  $\text{Ηχ\omega}$ , à verbo  $\text{Ηχ\omega}$ , id est, re-sono, vnde Latinis aptè redditus resonantia. Poetæ Latini eam modo Echo, modo imaginem vocis appellat, sic Virg.

*Saxa sonant, vocisque offensa resultat imago.*

Philosophis vox reflexa, reperiunt, reciproca etiam dicitur. hinc ad ipsius definitionem commodius iam transire licebit.

Secunda. Echo enim nihil aliud est, quam vocis articulatae, aut modulatae sonus reflexus, hoc videlicet modo, cum vox nostra prolata, ac motu aeris quoquoersus delata, obiecto directè corpori plano, cauo-ue, ac satis laevigato occurrens, inde pilæ instar ad nosmet reuertitur. vbi distinguendum est inter Bom-bum, & Echum.

Tertia. Bombus enim est quidem sonus reflexus, sed ob defectum alicuius circumstantiæ, ex ijs, quæ ne-cessariæ sunt ad Echum perficiendam, confusus, & inarticulatus. Echo autem propriè est, quæ voces arti-culatas, aut modulatas distinctè restituit. Cuius naturam, vt melius perscrutemur, animaduertimus non so-lum communi Physiologia, sed præterea opus esse eam legibus Geometriæ, atq; adeo linearibus demonstra-tionibus subijcere, more videlicet opticorum, qui visionis, atq; illuminationis naturam per lineas, & angu-los optimè solent explicare. quod si id cuipiam nouum, ac mirum videatur, non tamen impossibile videri debet, eum enim hæc resonantia fiat per reflexionem, reflexio autem omnis fiat per lineas, & angulos meri-to eam lineis, & angulis referendam esse duximus. sed in primis exponendæ sunt sequentes definitiones.

*Secunda* : l'écho n'est rien d'autre que le son réfléchi de la voix articulée ou modulée, c'est-à-dire lorsque notre voix portée et poussée de tous côtés par le mouvement de l'air, rencontrant directement un corps plan ou creux qui fait un obstacle assez lisse, revient à nous ensuite comme une balle. Il faut ici distinguer entre le bourdonnement et l'écho.

Et en effet, Biancani fait la distinction entre l'écho, qui rend des sons clairs et espacés, du 'bourdonnement' confus entendu dans les lieux réverbérants. Vient ensuite le principe directeur de sa théorie, la ligne sonore :

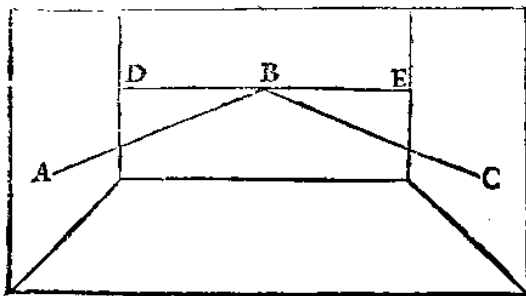
la ligne sonore, ou vocale, est droite en conséquence de quoi la voix se propage de façon directe. En outre, le son dans un lieu ouvert et libre se diffuse de tous côtés par des lignes, ceci se fait clairement avec raison.

Les raisons suivent, ou plutôt les exemples, ainsi que les affirmations d'identité de propagation entre la lumière et le son.

Puisque le son se déplace en suivant des lignes sonores, on applique les lois de la catoptrique, et la réflexion se fait selon le principe connu de l'égalité des angles d'incidence et de réflexion :

### *Anguli incidentiæ, & reflexionis lineæ sonoræ sunt inuicem æquales. Theorema I.*

**S**icuti in radijs lucis, & visus, prædicti anguli æquales existunt, vt optimè optici ostendant: ijdem eadem ratione existimandi hic quoq; sunt æquales. quod probè experientia confirmat, si enim duo sint ab eo-



dem pariete, necnon ab inuicem ita distantes, vt vnus audiat alterius Echum, sunt prædicti anguli æquales. vt in sequenti figura, si sonorum fit vbi A. audiens autem Echum ipsius ex reper-cussu parietis D B E. fit v. g. vbi C. obseruatio docet reflexionem fieri, in tali parietis loco, vt lineæ ductæ ab eo, ad sonorum vna altera ad au-dientem, faciant angulos D B A. E B C. æqua-les. ratio vero, seu causa huius æqualitatis est quia natura (nisi quod obstat) agit per lineas breuissimas, breuissimæ autem sunt in casu no-stro, quæ faciunt prædictos angulos compares, id est, ex omnibus lineis, quæ possunt duci ab A. per parietem D B C. ad C. breuissimæ omnium illæ sunt, quæ faciunt prædictos angulos æqua-

les. quod demonstratum habes à Vitellione lib. 1. num. 17. Tandem, hanc angulorum æqualitatem agnouit etiam Aristoteles, qui 2. de Anim. tex. 80. appositè docet, hanc reflexionem fieri eo modo quo pila latoria, reflectitur, ea enim normaliter parieti, aut pavimento allisa, etiam normaliter refilit. si verò obliquè, ea quo-que obliquè, necnon compari angulo in auersam partem resultat. imò expressè in Probl. sect. 1. num. 23. as-crit hanc reflexionem fieri per angulos æquales.



*Cum Echo statim post primam vocem, repetit omnes illius syllabas, necesse est durationem propagationis esse duplam orationis tam primariæ vocis, quam reflexæ. Theor. I X.*

**D**uratio enim propagationis, vti supra explicauimus, continet etiam durationem primariæ vocis, quia, sonante illa simul fit propagatio, & præterea continet durationem vocis reflexæ, sed duratio vocis reflexæ est æqualis durationi vocis primariæ, cum vna, & eadem fit prima, & reflexa. tota igitur propagatio constat in hoc casu ex duabus durationibus æqualibus, & inuicem continuis, id est, ex duratione primariæ vocis, & reflexæ, quare tota simul erit dupla tam primæ, quam reflexæ vocis. vera igitur est propositio.

En effet, la durée de propagation, comme nous l'avons expliqué ci-dessus, comprend bien la durée de la première voix, parce que la propagation se fait en même temps que le son se fait, et comprend ensuite la durée de la voix réfléchie. Mais la durée de la voix réfléchie est égale à la durée de la première voix, lorsque « une et la même », elle se fait première et réfléchie. Donc toute la propagation est composée dans ce cas de deux durées égales, et réciproquement, de la durée de la voix primaire et réfléchie, c'est pourquoi la durée totale est en même temps le double de la voix primaire ou de la voix réfléchie, donc la proposition est vraie.

On note l'expression « *una et eadem* » empruntée directement et sans doute ironiquement à la langue scolastique en ce qui concerne l'écho, on retrouve cette tournure dans presque tous les textes inspirés d'Aristote.

Biancani a également étudié l'influence de l'environnement, arbres, herbes, constructions et relief, sur les durées, les affaiblissements et les distances parcourues par le son. Le philosophe aura une grande influence sur les savants qui traiteront du sujet, notamment Mersenne dont il était l'ami, mais également sur les savants jésuites qui, comme Bettini et Kircher, vont développer longuement l'analogie entre son et lumière, en appliquant les lois de la catoptrique, invoquées ici par Biancani, à la réflexion des sons.

### Mersenne et l'écho efficace

Pour Mersenne, le débat sur la nature du son est clos, le son a une nature réelle et c'est un mouvement. Et donc ce mouvement prend un certain temps, et comme Mersenne, à l'inverse de Francis Bacon, est mathématicien, si le déplacement a une durée, il a une vitesse<sup>263</sup> :

Le Son ne se communique pas dans un moment, comme fait la lumière, selon toute son étendue, mais dans un espace de temps.

[...] Le Son ne peut remplir la sphère de son activité que dans un espace de temps, qui est d'autant plus long que le lieu où se fait le Son est plus éloigné de l'oreille, comme l'on expérimente en plusieurs manières, et particulièrement lors que l'on voit que la hache, ou le maillet du bûcheron et des autres qui frappent sur quelque corps, a déjà frappé deux coups lors que l'on oit le premier coup: ce qui arrive quand on est éloigné de cinq ou six cens pas, ou davantage.

L'approche géométrique de la propagation est clairement affirmée et l'énigme de la hache du bûcheron est enfin élucidée sans avoir recours à la différence de perception entre la vue et l'ouïe pour rester dans le dogme du son sans mouvement. Mersenne n'argumente pas, il énonce des vérités de bon sens vérifiables par des observations.

Quant à la réflexion du Son, on l'aperçoit dans l'Echo des Cloches, des Voix, et des autres Sons qui répondent deux, trois, ou quatre fois, et qui enseignent que les Sons se réfléchissent comme la lumière, lorsqu'ils rencontrent des corps fermes et durs, soit diaphanes ou opaques, qui leur résistent

Mersenne, comme tous les auteurs, décrit l'écho comme une réflexion semblable à celle de la lumière. Cependant, lorsqu'il étudie plus profondément, il admet que l'écho n'obéit pas aux lois de la catoptrique<sup>264</sup> :

Ce [expliquer l'écho] qui serait très aisé si la réflexion des Sons se faisait comme celle de la lumière, que les Géomètres règlent dans la Catoptrique suivant les différentes incidences du rayon qui tombe sur les corps dont les plans sont droits, concaves et convexes. Mais parce que l'air est sujet à plusieurs mouvements étrangers, qui l'empêchent souvent de se porter en droite ligne, ce qui n'arrive ce semble pas à la lumière, il n'est pas possible de régler les Echo aussi infailliblement que les réflexions de la lumière, quoiqu'il nous en faille servir pour expliquer celles des Sons.

Mersenne ne tombe pas dans le piège de l'analogie complète avec la lumière, et c'est assez rare pour être souligné. En effet, le son ne se propage pas comme la lumière. Mersenne dit que l'air est sujet à plusieurs mouvements étrangers, on doit sans doute comprendre que l'environnement empêche le son de se propager en lignes droites. Quoi qu'il en soit, Mersenne observe, et si les causes ne sont pas encore établies, il défend, contre l'opinion courante, que si la lumière se propage en lignes droites, ce n'est pas le cas du son. Toutefois, ici il

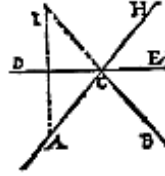
<sup>263</sup> *Id. prop. 8.*

<sup>264</sup> *Id. prop. 26.*

admet que les lois de la catoptrique sont nécessaires pour comprendre les réflexions du son et, les précautions prises, Mersenne se range derrière la position dominante, c'est-à-dire :

Je dis donc premièrement que le Son se réfléchit selon les angles d'incidence qu'il fait sur les corps qui se réfléchissent :

Mersenne, Nature, 49,1

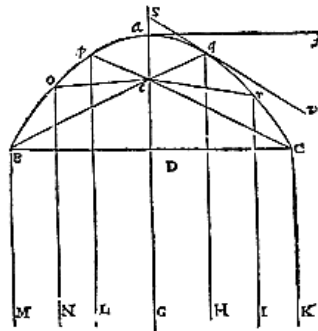


Par exemple, si le Son se fait au point A, et qu'il tombe sur la muraille ou sur le plan D E au point C, il se réfléchira au point B, parce que l'angle de réflexion E C B doit être égal à l'angle d'incidence D C A, et conséquemment l'Echo se fera au point B, et dans toute la ligne B C.

Il est assez fréquent que Mersenne se comporte ainsi, avec prudence. Cet esprit consensuel ne cherche pas la polémique, c'est un rassembleur qui donne l'occasion à tous les points de vue de s'exprimer. Même si dans la suite de son ouvrage il aura tendance à adopter la position catoptrique, il ne faut pas négliger l'apport qu'il fait ici en manifestant ses doutes.

Après avoir constaté par observation que toutes sortes de surfaces et de matériaux, pas forcément lisses et durs, pouvaient réfléchir le son, Mersenne s'intéresse aux surfaces d'une forme particulière, un cas limite en quelque sorte, la surface parabolöide :

Et l'on n'expérimenta jamais que l'air réfléchi par un corps concave soit plus épais dans le point de réflexion qu'en un autre lieu, si ce n'est que l'on dise que le Son qui s'entend audit point, témoigne l'épaisseur de l'air, comme l'ardeur de la lumière montre celle des rayons [...] C'est pourquoi je conclus que l'Echo ne se fait pas dans les lieux concaves par la réflexion de plusieurs parties d'air dans un même point, ou dans un petit espace.



La modélisation de la propagation du son, pour Mersenne, est encore assez confuse : ici le son se propage par des déplacements de parties d'air, ce qui évoque les positions atomistes. Si les 'rayons sonores' sont supposés être convergents vers un point focal, alors il devrait y avoir accumulation d'air, l'air deviendrait 'épais', et puisque ceci n'est pas constaté, c'est que la théorie de la convergence n'est pas valide.

Toutefois, à ce moment de la rédaction de l'*Harmonie Universelle*, qui semble être écrite comme un journal, au fil de la pensée de l'auteur, c'est bien la perplexité qui prédomine. Mais Mersenne, à l'inverse de son ami Descartes toujours affublé de vaines certitudes assénées avec arrogance, n'hésite pas à avouer son ignorance, et c'est ce qui fait qu'il est, en physique particulièrement, un vrai philosophe en quête de la vérité scientifique par des hypothèses cohérentes, des lectures fructueuses et non polémiques et des vérifications méthodiques :

C'est pourquoi je conclus que l'Echo ne se fait pas, dans les lieux concaves, par la réflexion de plusieurs parties d'air dans un même point, ou dans un petit espace, et qu'il est très mal aisé de savoir comme il se fait.

Et pourtant, dans la proposition 28, Mersenne revient sur ce qu'il affirme ici, et suit ceux qui défendent la théorie inexacte des 'rayons sonores', ce qui est bien la manifestation de sa démarche scientifique.



Il est semblablement difficile d'expliquer comment l'air retient le même mouvement depuis qu'il a été mu par les corps qui font le Son, jusqu'à tous les retours qu'il fait en se réfléchissant. Et, si c'est le même air qui revient ou un autre différent, ce qui a fait résoudre plusieurs à mettre des images, ou espèces intentionnelles du Son, afin d'éviter ces difficultés et de couper le nœud qu'ils n'ont pu défaire.

Mais puisqu'ils sont contraints d'avouer qu'elles suivent ou accompagnent le mouvement de l'air, dont elles ne peuvent tellement se détacher qu'elles n'en imitent la tardiveté, et les autres qualités, et qu'ils rencontrent partout les mêmes difficultés ou de plus grandes, il n'est pas nécessaire d'admettre ces nouveaux êtres diminués et intentionnels, quoiqu'il soit libre à chacun de s'en servir dans la recherche, et dans la solution des difficultés.

Or il y a trop peu de choses connues de l'Echo pour en faire une science aussi certaine que l'Optique; et l'on ne peut ce semble faire des Echo portatifs qui réfléchissent le Son aussi régulièrement, comme les miroirs réfléchissent la lumière, ou du moins l'art n'en est pas encore inventé.

L'écho est donc bien le phénomène qui permet d'appréhender toutes les problématiques liées à la propagation des sons, dont la plus délicate est sans doute la conservation du timbre, qu'on a en effet nommé 'image', 'espèce' ou 'couleur' du son. Les espèces intentionnelles des Scolastiques ne sont là que pour résoudre des problèmes rhétoriques et non physiques. Entre le modèle du miroir, qui conserve l'image, et le modèle de la percussion, qui conserve la force et la trajectoire par symétrie, la modélisation de la réflexion des sons parvient mal à trouver sa place, du moins chez ceux qui cherchent à comprendre et non à seulement défaire les nœuds...

Si quelqu'un peut faire des Echos qui répondent sept, quatorze, ou vingt fois, comme font quelques-uns que l'on a remarqués en Italie, en France et ailleurs, et d'autres, dont le dernier réponde plus fort que le premier, comme l'on a remarqué quelquefois, ou que l'on en puisse faire qui répondent autre chose que ce que l'on dit, par exemple qui répondent en Espagnol lorsque l'on parle en Français, ou qui répondent en un autre ton, par exemple à l'Octave plus haute ou plus basse, ou qui répondent seulement la nuit, ou à midi, ou à certaines heures du jour, comme quelques-uns disent en avoir remarqué; et finalement si quelqu'un trouve l'art de disposer les Sons en autant de manières que l'on peut disposer la lumière par le moyen des différentes figures, et du poli que l'on donne à toutes sortes de corps, il pourra faire une nouvelle science des Sons, que l'on nommera, si l'on veut, Echometrie, ou mesure des Sons.

Devant les certitudes et les légendes tant de fois racontées sur l'écho, Mersenne se fait un peu amer, et lance en quelque sorte un défi à la communauté scientifique, dans le but de déterminer de façon certaine toutes les lois de l'écho et de la propagation des sons sous le nom d'une science à inventer, l'échométrie. C'est à ce point du chapitre que Mersenne cite le long texte d'un ami inconnu, sans doute Giuseppe Biancani, auteur en 1615 d'une 'Echométrie' parue en 1620 dans son ouvrage célèbre, *Spaerae Mundi* dont elle constitue la troisième partie.

Il s'agit du 'Traité particulier de l'Echo' dont Mersenne ne dévoile pas l'identité de l'auteur, peut-être Biancani, qu'il introduit respectueusement<sup>265</sup> :

[...] mais je parlerai encore de l'Echo et de la réflexion, après avoir ici donné plusieurs observations qu'un excellent esprit fit sur Marne l'an 1625.

Quoi qu'il en soit, ce texte est une longue description d'expériences diverses sur l'écho, agrémentée de commentaires lyriques sur la nymphe de l'Antiquité.

Voici comment ce mystérieux observateur de l'écho propose de mener correctement les recherches<sup>266</sup> :

La manière de rechercher la nature de cette image de la voix est double, à savoir par l'opération et la pratique, ou par la spéculation et la Théorie Philosophique. La Théorie se prend des trois principes de génération, à savoir de la matière, de la forme, et de la privation; ou des quatre causes, ou des universaux, ou des dix Catégories. La pratique consiste aux promenades, où deux cailloux frappés l'un contre l'autre servent pour le soulagement de la voix, en remarquant les retentissements qui sont les préparatifs, les avant-coureurs, et les fourriers marquant le logis et la demeure de l'Echo. Et puis l'on use d'un plan géométrique pour tracer la figure des lieux, avec le pas Géométrique de cinq pieds de Roy. Puis après on suit pas à pas ce qu'on cherche en tous les endroits de la Sphère d'activité, où il y a moins ou plus de force jusqu'à ce que l'on parvienne

<sup>265</sup> Marin Mersenne, *Harmonie Universelle*, Paris, 1636, livre I, prop. 26. La teneur du texte, l'allusion à l'échométrie, la citation de l'auteur dans un paragraphe qui suit ce texte, et l'amitié que Mersenne entretient avec Biancani laissent entendre qu'il pourrait s'agir du savant Bolognais. Mais Mersenne indique l'année 1625, l'auteur reprend également cette date, et Biancani est décédé en 1624, selon toutes les sources. Par ailleurs, la plupart des exemples sont situés en Italie.

<sup>266</sup> *Id.*, prop. 26

devant le corps réfléchissant, pour voir quelle est la ligne vocale, à quel point elle commence d'agir, où elle finit, quel temps est plus propre pour l'Echo, quels sont les intervalles de la prononciation et de la répétition, avec une montre à la main, ou avec les tours de bras circulaires, dont on marque la différence des pauses et des intervalles.

L'auteur se fait moqueur envers les péripatéticiens et décrit sa méthode : une promenade, deux cailloux qu'on cogne pour ne pas fatiguer la voix et une écoute attentive. Puis on fait de la géométrie, on mesure, on évalue l'intensité sonore, on localise le corps réfléchissant et les trajectoires du son, et on mesure les durées avec des méthodes empiriques. Les distances sont mesurées avec le pas géométrique qui fait 5 pieds (une toise est égale à 6 pieds donc à 6/5 pas).

En général, les auteurs précisent bien que les surfaces réfléchissantes doivent être solides, dures et polies. Cependant note auteur, qui apparemment a observé un grand nombre d'échos, rapporte que la nature du matériau faisant écho est peu importante :

Quant à l'habit de cet invisible, il reçoit toute sorte de couverture, car il ne dédaigne pas les murailles et les voûtes décrépies et polies, les herbes, les saules, les marais, les vieilles masures, les jardins et les feuilles.

Tout en évoquant dans un style lyrique et léger la nymphe Echo et ses caprices, la critique du modèle scolastique est toutefois présente tout au long du texte :

C'est ce qui me la pourrait faire appeler substance plutôt qu'accident, puisqu'elle n'est qu'un air qui a reçu l'impression de telles ou telles paroles que l'homme lui communique lorsqu'il pousse de ses poumons un air animé de syllabes articulées.

En effet, l'allée et la venue prompte ou tardive, et l'éclat de l'air brisé par une collision des corps fait assez voir que le Son n'est pas un simple accident, mais une substance, laquelle n'est pas toujours la même en espèce mais en genre, puisqu'elle ne rend pas toujours le même Son, ou le même ton.

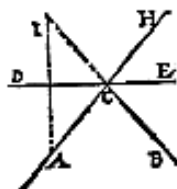
Les observations sont chiffrées et pertinentes :

Quant à la quantité et à la longueur de la ligne vocale de l'Echo, je trouve que pour entendre clairement un dissyllabe, il faut vingt-cinq à trente toises de distance, et qu'il ne faut pas que le lieu soit vague, mais renfermé par quelque continuation de muraille, ou fossé.

Cette dernière remarque est précieuse, car c'est une condition essentielle de la production d'un écho : il est nécessaire, en effet, que le son soit canalisé, afin qu'il ne subisse pas l'atténuation qui accompagne sa diffusion sphérique (ou plutôt hémisphérique) à l'air libre.

A la suite de cet exposé d'un savant inconnu, Mersenne reprend ses observations :

Si le Son ne perd nulle partie de sa force par sa réflexion, il faut diviser sa ligne vocale ou sonore en deux parties égales, dont l'une commence au lieu où se fait le Son et se va terminer au corps qui le réfléchit, et l'autre commence au corps réfléchissant et finit à l'oreille qui reçoit l'Echo. De sorte que si le Son est assez fort pour être ouï de mille pas en ligne droite, le corps qui fait l'Echo peut être éloigné de cinq cents pas. Par exemple, si la ligne vocale entière est d'A à H, alors que le Son rencontre la surface réfléchissante DE au point C, il se réfléchira jusqu'au point B. Car l'angle d'incidence ACD est égal à l'angle de réflexion BCE; et le Son qui vient du point A ne peut arriver au point B par un chemin plus court que par les lignes AC et CB.



Le problème a été traité par Biancani, il s'agit de déterminer la distance maximum qui permet à un écho d'être entendu, en fonction de la distance à laquelle un son direct est audible. Le résultat, prévisible, est la moitié de cette distance, mais il convenait de vérifier, pour s'assurer que l'atténuation était de même raison pour le son direct et pour le son réfléchi.

Autre question suscitée par ce schéma et par la dernière phrase, on voit bien que le son direct pourrait faire AB sans passer par C, et c'est d'ailleurs ce qui se produit en réalité : l'écho peut avoir un délai plus long

que prévu, puisque sa trajectoire est ACB, alors qu'en B on perçoit le son direct par le trajet AB, non figuré sur le schéma. Le délai de l'écho est alors bien le double de AC, mais pas de AB qui est plus court. Cette particularité va plonger Mersenne dans une grande perplexité et il envisagera même, plus tard, que les sons direct et réfléchi seraient de durées différentes. La modélisation par les lignes sonores exclut de fait la propagation circulaire et induit ce type d'impasses lors de la vérification expérimentale :

Or il se rencontre ici plusieurs difficultés, dont la solution dépend de l'expérience: par exemple, à savoir si le Son qui commence au point A va plus vite par la ligne d'incidence AC, qu'il ne revient par la ligne de réflexion CB, et de combien il va plus ou moins vite que l'autre.

Cette question de la 'vitesse' comparée du son direct et réfléchi va agacer longtemps Mersenne, on le verra à propos de la vitesse du son.

Encore un exemple de cette méthode scientifique qui se met en place, une confrontation d'expériences entre son ami Biancani et lui-même, à propos de la distance minimale de perception d'un écho monosyllabique, c'est-à-dire d'un son d'une durée très courte et qui revient immédiatement. C'est en effet la méthode de mesure de l'écho. Les syllabes sont prononcées régulièrement selon une certaine cadence. On s'arrange, au moyen de phrases préparées à l'avance comprenant un nombre déterminé de syllabes, pour qu'on entende le début de l'écho juste après la dernière syllabe prononcée. Ensuite on estime la distance, sachant qu'il faut environ entre 20 et 30 pas géométriques par syllabes (selon Biancani et Mersenne, soit de 30 à 50 m environ par syllabe prononcée donc en un tiers de seconde environ). Puis une fois sur place, on cherche le corps réfléchissant.

Voici par exemple, le récit de certaines expériences de Mersenne :

Combien il faut s'éloigner du corps qui réfléchit pour entendre l'Echo. Biancan [Biancani] a remarqué qu'il faut être éloigné de vingt-quatre pas géométriques ou environ, c'est-à-dire de quarante huit pas communs pour ouïr les moindres Echos, que l'on appelle monosyllabes, parce qu'ils ne répondent qu'une seule syllabe, à raison que les autres syllabes reviennent trop vite à l'oreille, et se confondent dans la rencontre qu'elles font des autres. J'ai néanmoins expérimenté que l'Echo répond une syllabe à vingt-deux pas géométriques, mais l'on peut encore faire plusieurs expériences pour accourcir ce chemin.

Quant au mystérieux auteur cité par Mersenne, voici un exemple de ses recherches :

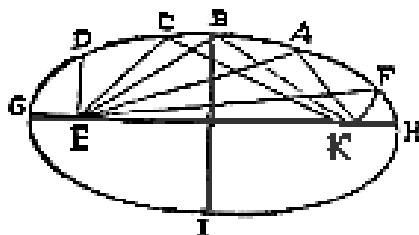
J'en ai rencontré un autre [écho] à cent pas géométriques, qui est un peu faible, et se ressent recru de la longueur du chemin à travers les broussailles, les haies, les vieilles mesures, les chaumières éparses çà et là sans aucun ordre, les arbres, les palissades, les jardins, et la basse-cour des fermes, lequel enfin va aboutir dans un coin de bâtiment bien percé qui a de la terre derrière jusqu'à la moitié de sa hauteur. Il répète brièvement, quoique distinctement 4, 5, 6, sept syllabes et plus, comme colintampon, abdenago, l'amerabaquin, parafaragaramus, arma virumque cano. Il s'entend de six vingts pas géométriques, lorsqu'on monte sur des buttes hautes de trois à quatre pieds, autrement il est si languissant qu'il en devient muet et qu'il fait le sourd.

Entre ces observations méthodiques et les descriptions rapportées de voyageurs sur des échos extraordinaires qui semblent parfois inspirer le doute à nos auteurs, Mersenne élabore des hypothèses et imagine des dispositifs qui permettraient d'utiliser l'écho comme instrument de mesure de phénomènes physiques variables dans le temps. Comme on le verra, il va utiliser l'écho pour mesurer la vitesse du son. Une fois cette vitesse déterminée, et Mersenne n'a aucun doute sur la précision qu'il atteindra au cours de ses expériences, la relation entre vitesse, durée et distance permet d'imaginer toutes sortes de procédés de détermination d'une de ces trois grandeurs en connaissant les deux autres. Par ailleurs, puisqu'il s'est rangé à l'opinion générale des savants concernant les rayons sonores, Mersenne va proposer nombre de procédés qui mettent en œuvre la catoptrique des sons.

Tout d'abord, puisque Mersenne est devenu maintenant un ardent défenseur des rayons sonores, il applique les règles de la catoptrique à l'architecture, ici des jardins, et propose ce dispositif<sup>267</sup> :

[...] le concave Elliptique est le plus propre de tous pour ce sujet, car si l'on fait une muraille au bout d'un jardin, comme est celle du jardin des Tuileries, laquelle suive la forme de la demi Ellipse G D C B A F H,

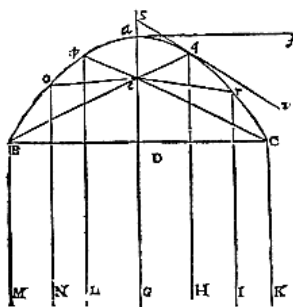
<sup>267</sup> *Id.*, prop. 28.



ou une partie d'icelle, par exemple DF, il est certain que le Son qui se fera au point E, enverra les rayons sonores ED, EC, EB, EA et EF sur la glace concave DBF, et que toutes ces lignes sonnantes se réfléchiront au point K, puis qu'il est démontré que les rayons de la lumière font la même chose, parce que toutes les lignes tirées de l'un des centres de l'Ellipse à l'autre, à savoir EDK, ECK, et cetera sont égales. Et s'il y avait une salle longue de cent toises, dont le lambris ou une partie de la courbure eût la figure d'un côté d'ellipse, par exemple du côté précédent DF, celui qui parlerait au point E serait aisément entendu de celui dont l'oreille serait au point K, encore que la voix fût bien faible, et que nul autre ne pût rien entendre dans la ligne droite EK ni même dans la concave D B F, parce que toutes les lignes vocales se ramassent, et s'unissent seulement au point K.

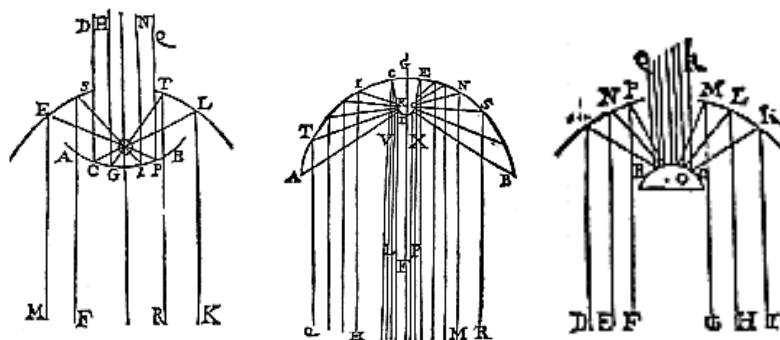
Ici, il n'est pas question d'écho, mais de réflexions particulières, on sait que si cet effet est bien constaté en de multiples lieux, il est en effet dû à la focalisation des champs sonores aux foyers de l'ellipse, mais il s'agit d'un cas limite qui ne prouve en rien l'existence de 'rayons sonores' comme le prouve le contre-exemple de la réflexion sur une surface plane qui, la plupart du temps ne produit pas d'écho. On obtient le même effet avec les autres coniques, parabole et hyperbole. Les surfaces circulaires produisent également cet effet, mais avec moins d'efficacité. D'ailleurs Mersenne précise en *errata*, à la fin du livre III : « l'Echo des Tuilleries est fait par une muraille ronde, et non elliptique ».

Voici l'exemple de la parabole :



La parabole BaC peut aussi servir pour faire des Echos, si l'on s'imagine que la voix en puisse être si éloigné que les lignes vocales qui tombent sur sa concavité, imitent les lignes parallèles, ou si l'on use de plusieurs instruments, par exemple de cinq Trompettes mises aux points N, L, G, H, I et K dont les rayons sonores NO, Lp, Ga, Hq, et Ir se réfléchiront au point e, ou se fera l'Echo. De sorte que l'oreille qui sera en e ouïra parfaitement les sons des Luths ou des autres instruments que l'on touchera aux points N, L, G, et cetera.

Puis, loin d'être dépourvu d'imagination, comme il a également imaginé le télescope à miroir parabolique, Mersenne décline l'invention pour le son et propose des dispositifs censés amplifier par concentration des 'rayons sonores' :



La parabole peut encore servir à plusieurs autres usages, [...] comme l'on peut s'imaginer en considérant les figures qui suivent, dont la première LE signifie la parabole qui réfléchit les rayons, qu'elle reçoit parallèles, à son focus, lequel je suppose être en O, comme l'on voit aux rayons MEO, et KLO. Et, parce que je mets un autre petit miroir Parabolique AB qui reçoit tellement les rayons réfléchis par la grande qu'ils passent tous par le centre ou le focus commun des deux O, il s'ensuit que le concave AB renvoie tous les rayons parallèles CD, GH, IN, et PQ. De sorte que, si ces lignes sont vocales, on entendra quasi aussi bien les Sons des points D H N Q, que si l'on était proche de ceux qui parlent, qui touchent le Luth, ou qui sonnent de la Trompette aux points M F R K.

Et si les lignes appartiennent à la lumière, la glace AB réfléchissant tous les rayons qu'elle reçoit, par l'ouverture du fond de la glace ST, enverra la lumière et le feu aussi ardemment aux points D et Q, jusqu'à telle distance que l'on voudra, comme elle les reçoit dans elle même, puisqu'elle conserve les mêmes rayons en même densité, force et épaisseur. Mais puisque nous ne connaissons point de matière assez forte pour résister au feu, ou pour conserver son poli, il serait plus à propos d'user de cette invention pour faire des lunettes de longue vue, car l'œil posé tant loin que l'on voudra vers les points D H Q, verrait les objets M F K aussi clairement que s'il en était proche, à raison que chaque point desdits objets enverraient autant de rayons à l'œil, comme il en serait reçu sur la glace AB.

Ces 'expériences', ou du moins ces représentations, seront reprises de nombreuses fois, plus souvent dans des écrits que dans la réalité, et donneront lieu à toute une littérature des 'rayons sonores' jusqu'au XX<sup>ème</sup> siècle, notamment en acoustique architecturale des lieux scéniques...

Mais Mersenne avait imaginé bien d'autres applications de l'écho, en voici quelques-unes, développées dans le livre III, après avoir corrigé ses premières estimations suite à des expériences plus rigoureuses (une syllabe est maintenant prononcée en un septième de seconde)<sup>268</sup>.

Comment mesurer des largeurs inaccessibles :

[...] l'on peut mesurer la largeur des fossés d'une ville ou de tels autres lieux accessibles ou inaccessibles par le moyen de l'Echo. Par exemple, si les murailles de la ville répondent seulement une syllabe prononcée dans 1/7 de seconde de dessus le bord desdits fossés, ils n'ont tout au plus que 12 toises de largeur, et si l'on en est tellement éloigné que l'Echo réponde 7 syllabes prononcées dans une seconde, et qu'il y ait 60 toises du lieu où s'entend l'Echo jusque sur le bord des fossés, ils seront larges de 21 toises.

Mersenne propose même un procédé de télécommunications :

[...] il faut conclure que le son peut aller dans le temps de 21 heures 5 minutes tout au tour de la terre, et par conséquent que, s'il y avait des postes de la voix ou d'autres sons en des lieux convenables, que l'on pourrait apprendre chaque jour tout ce qui s'est fait sur toute la surface de la terre, en quelque lieu que l'on pût demeurer. Par exemple, ce qui se fait maintenant à Paris peut quasi être su aux Antipodes dans dix heures et demie, et dans tous les endroits de la terre qui sont entre nous et lesdits Antipodes, s'il y avait des postes des deux côtés: ce qui n'est pas impossible, si les Rois de la terre y voulaient entendre, d'où ils tireraient plus de contentement dans un jour qu'ils n'en reçoivent en toute leur vie. Et tous les arts et les sciences en recevraient de très grandes lumières en peu de temps, de sorte que l'on peut dire que les hommes se privent de la plus grande perfection dont ils sont capables, faute d'une mutuelle intelligence, laquelle nous ne verrons point, si la grande loi de la morale ne possède le cœur de tous les habitants de la terre, et particulièrement celui des Grands, qui donnent le branle à tous les autres par leur seule parole.

L'écho peut également servir à mesurer l'intensité relative de la voix :

L'on peut savoir de combien une voix est plus forte l'une que l'autre par le moyen de l'Echo, car si l'une n'a la force que de faire répéter 4 syllabes, et l'autre 8, celle-ci sera plus forte de moitié, et ainsi des autres. Où il faut remarquer que plusieurs ne peuvent se persuader que la voix forte n'aille point plus vite que la faible: mais ils quitteront cette opinion à la première expérience qu'ils en feront, soit que le son se fasse par le seul battement de l'air, ou par les images de la voix que l'on appelle intentionnelles. La même chose arrive aux cercles de l'eau, qui ne se font pas plus vite quand on la frappe plus fort.

Mersenne ne résiste pas à taquiner certaines opinions reçues sur le rapport entre la vitesse et l'intensité de la voix, quelle que soit l'école philosophique de ces savants. En revanche, si on peut faire beaucoup de choses grâce aux échos, ils ne peuvent pas tout :

Mais je ne crois pas qu'il soit possible de faire des Echos qui répondent en autre langue ni d'autres syllabes que les mêmes que l'on prononce. Il n'y a nul ressort lequel puisse être débandé pour former de nouvelles syllabes par le mouvement de l'air qui fait le son, puisque ce mouvement

<sup>268</sup> *Id.* livre III, prop. 21, corollaires.

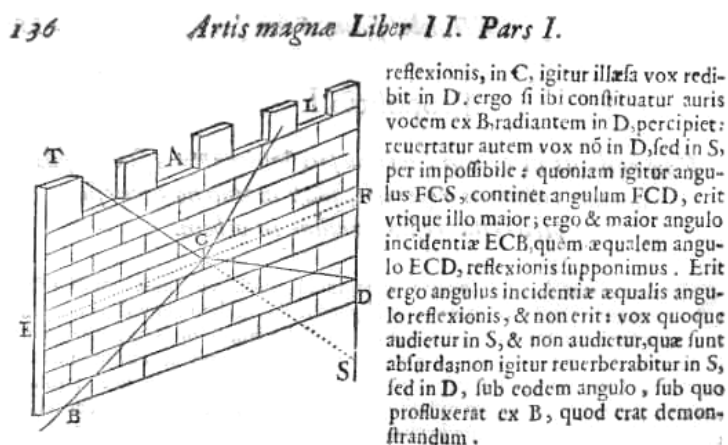
d'air est insensible lorsqu'il arrive aux lieux qui réfléchissent, lesquels ne renvoient toujours que les mêmes syllabes qu'ils reçoivent, quelque forme ou figure qu'on leur puisse donner. De sorte que l'on ne peut pas faire tant de variétés avec l'Echo qu'avec les miroirs, ou avec les verres, si la nature ne nous enseigne d'autres phénomènes que ceux que l'on a remarqués jusqu'à présent.

En effet de nombreuses légendes circulent, encore à l'époque de Mersenne, sur des échos extraordinaires qui répondent en d'autres langues, ou par des mots différents, ou encore qui modulent les notes à la quinte ou à la tierce dans le cas d'instruments de musique.

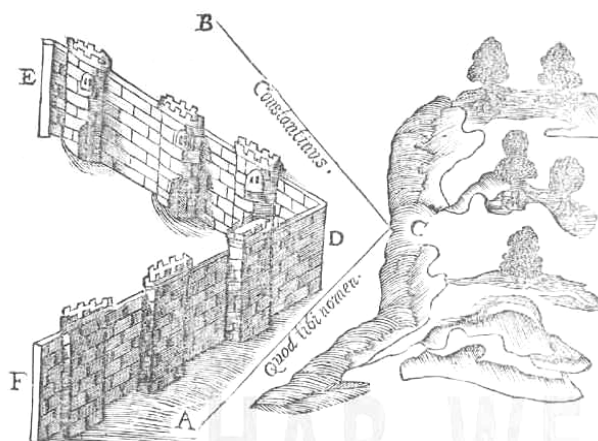
Toutefois, de toutes ces propositions, il en est une que Mersenne va réellement expérimenter, c'est l'utilisation de l'écho pour mesurer la vitesse du son.

## La phonocamptique de Kircher

On ne peut pas parler d'écho au XVII<sup>e</sup> siècle sans évoquer Kircher et la phonocamptique. Esquissée dans un de ses premiers livres<sup>269</sup>, développée dans sa célèbre *Musurgia* de 1650<sup>270</sup>, et abondamment développée en 1673 dans la *Phonurgia*<sup>271</sup>, la phonocamptique est la science des sons dont la propagation est envisagée selon les mêmes lois que celle de la catoptrique. Les sons se propagent par des rayons sonores et donc se réfléchissent selon la loi des angles d'incidence et de réflexion. Utilisant, comme Biancani, Bettini et Mersenne, les cas limites des réflexions focalisées par des paraboles ou des ellipses, Kircher généralise et imagine des miroirs acoustiques propres à créer autant de types d'échos qu'on voudra. Kircher expérimente peu mais fait réaliser de nombreux dessins remarquables dans le but d'illustrer ses démonstrations.



Certes, le son émis en B sera bien réfléchi en D. Mais Kircher affirme, qu'au point S on n'entend rien du tout, *quod erat demonstrandum*...



<sup>269</sup> A. Kircher, *Ars magna lucis et umbræ*, 1646, lib. II, pars I, cap. VI et VII, p. 131-146.

<sup>270</sup> A. Kircher, *Musurgia universalis sive ars magna consoni et dissoni*, Rome, 1650, liber IX, 'Magia phonocamptica', tome 2, p 237-308.

<sup>271</sup> A. Kircher, *Phonurgia nova*, Kempten, 1673.

On atteint un sommet dans ce dessin qui suggère qu'un interlocuteur placé en A pourrait poser une question (« *quod tibi nomen ?* ») à un autre qui se tient en B, en utilisant la réflexion sur le rocher C, ce qui permettrait à B de répondre « *Constantinus* », sans que les gardes disposés sur les murs d'enceinte n'entendent rien de ce dialogue.

On verra dans une autre partie comment les jésuites tels que Kircher tentaient d'utiliser les effets spéciaux sonores pour créer des ambiances stupéfiantes auprès des fidèles.

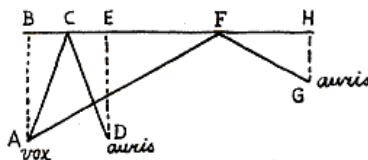
### Atomistes et cartésiens, la réflexion des corpuscules

Pour les atomistes qui envisagent la propagation des sons comme un flux de corpuscules, la réflexion du son par l'écho est très simple, elle obéit aux lois de la mécanique. Les corpuscules sont des petits corps, et lorsqu'ils heurtent un obstacle, il rebondissent.

C'est ainsi que Beeckman représente la réflexion par l'écho<sup>272</sup> :

Vocis locum invenire unde veniat.

Si solo auditu vocis alicujus velis scire locum, unde vox prodit, reflectatur vox ad corpus aliquod, et bis diverso loco stans, illum audias, et quaere punctum aliquod in quod lineae, ab aure tua ad corpus secundum aequales angulos reflexae, utraque desinant. Punctus hic erit locus vocis.



[Trouver la position d'où vient la voix

Si, comme unique auditeur, tu veux connaître la position de la voix de quelqu'un, d'où la voix provient, la voix se réfléchit sur un corps quelconque, te tenant dans deux endroits différents, écoute le et cherche le point où les lignes qui partent de ton oreille vers le second corps arrêtent des angles égaux de réflexion. Ce point est le lieu d'où vient la voix.]

Il ne s'agit pas ici d'écho, mais Beeckman met en œuvre sa théorie des corpuscules de son et le schéma montre bien les trajectoires des corpuscules de son. Une simple lecture de ce schéma fait bien entendu penser aux dessins de Biancani lorsqu'il développe sa théorie des lignes sonores, et la tentation est grande d'y adhérer, tellement la représentation qu'on se fait de la réflexion des sons semble naturelle par cette modélisation. On comprend mieux pourquoi les savants de la contre-réforme, et en particulier les Jésuites, ont développé avec autant d'insistance la théorie des 'rayons sonores' qui constituait en quelque sorte un contre-feu à la théorie atomiste.

Lucrèce avait en son temps traité le thème de l'écho dans le *De natura*<sup>273</sup> :

Une partie des voix qui ne frappent point nos oreilles va au-delà et se dissipe dans les airs; une autre partie, qui se heurte à des corps durs qui la rejettent, revient sur nous et nous pouvons être trompés par ce phénomène de l'écho. Grâce aux vérités que je t'enseigne, tu pourras t'expliquer à toi-même comme à autrui ce qui se passe dans les lieux déserts lorsque les rochers nous renvoient les mots exactement dans leur ordre, tandis que nous cherchons des compagnons égarés dans les ténèbres de la montagne et que nous appelons à grands cris leur bande éparse. J'ai même entendu jusqu'à six ou sept échos redire une seule parole; car la voix, réfléchi de colline en colline, était fidèlement renvoyée.

Gassendi, représentant du courant atomiste au milieu du XVII<sup>e</sup> siècle, parle ainsi de l'écho<sup>274</sup> :

Is autem sonus reflexus est echo, quae Aristotele non modo comparatur pilae verum etiam luci, prout iisdem legibus reflexionis subicitur; neque etiam male a Virgilio Lucretium imitante imago dicitur : *Saxa sonant, vocisque offensa resultat imago*

<sup>272</sup> Isaac Beeckman, *Correspondance*, Ed. C. de Waard, M. Nijhoff, La Haye, 1939, t 1, Décembre 1616-mars 1618, p. 159.

<sup>273</sup> Lucrèce, *De natura*, IV, 570.

<sup>274</sup> Pierre Gassendi, *Animadversiones in decimum librum Diogenii Laertii*, Lyon, Anisson, 1649, t 1, p.274. François Bernier, *Abrégé de la philosophie de Gassendi*, Anisson, Lyon, 1674, p. 368.

[C'est ce son réflexe qu'on appelle écho, et qu'Aristote compare non seulement avec une balle, mais encore avec la lumière, en ce que le son et la lumière sont sujets aux mêmes lois de la réflexion ; et c'est cet écho que Virgile, à l'imitation de Lucrèce, appelle image lorsqu'il dit : « et des roches sonores où l'écho répercute le son qui les frappe »]

Chez les atomistes, le caractère important du son est son 'image', c'est-à-dire le 'timbre' ou ce qui fait que la même note jouée à la viole ou à la flûte n'a pas le même son. La conservation de cette 'image' malgré les réflexions, les atténuations ou les superpositions avec d'autres sons constituent le premier problème pour Gassendi et ses adeptes. La physique du son des Atomistes est la seule approche qui insiste autant sur cette qualité primordiale du son que les autres théories ne parviennent pas à expliquer et qu'elles évitent avec constance. Encore une fois, c'est le phénomène de l'écho qui met en évidence cette problématique<sup>275</sup> :

[...] L'écho a quelque chose de semblable à une image qu'un miroir ou quelque autre chose polie réfléchit à nos yeux. Car de même que, outre l'image qu'un objet envoie directement à notre oeil, il y en a un nombre innombrable d'autres que ce même objet envoie dans diverses parties de l'espace circonvoisin, lesquelles pourraient être renvoyées à nos yeux s'il y avait partout des miroirs justement placés et disposés pour cela ; de même, outre la voix ou le son qui sort avec impétuosité de notre bouche ou de quelque autre corps, et qui vient en premier lieu à notre oreille, il y en a un nombre innombrable d'autres répandus dans l'air qui peuvent être réfléchis vers nous et qui nous peuvent faire derechef entendre la même voix s'ils tombent sur des corps solides, et quelque peu polis ; je dis solides, et quelque peu polis, parce que s'ils sont trop poreux, ils laissent passer le son sans le réfléchir, et s'ils sont trop raboteux, ils le rompent, et le dissipent.

En effet, s'ils sont poreux, les corps réfléchissant vont absorber le son, et c'est ici un petit problème puisque l'observation attentive de l'écho montre qu'il peut se produire avec des arbres, des surfaces rugueuses, voire des nuages. La théorie corpusculaire fonctionne selon les lois de la mécanique, les corps sont projetés, ils rebondissent contre les obstacles, pourvu que ceux-ci ne puissent pas absorber le choc. Quelques observations sur le phénomène suivent<sup>276</sup> :

Mais pour entrer davantage dans le détail et dans la connaissance du son réflexe, il faut remarquer en premier lieu que si vous êtes placés trop près du corps réfléchissant, et que le son se fasse proche de vous, il ne se fait alors aucun écho, ou plutôt on n'en distingue aucun, parce que la voix qui vient directement et celle qui vient par réflexion entrent dans l'oreille si continûment, je veux dire par une suite si continue, que le moment de temps qui se trouve entre les deux est imperceptible, en sorte qu'elles ne paraissent qu'une seule et unique voix ; le sentiment n'ayant pas assez de temps pour la distinguer. Et pour lors, le son est plus fort, et en quelque façon de plus longue durée. Ce qui se trouve encore plus vrai si la réflexion se fait en même temps de plusieurs endroits, comme dans une voûte, où se font plusieurs réflexions, plusieurs fois répétées, d'où il s'ensuit non pas un son distinct, mais un bourdonnement confus.

Il s'agit ici de la description du phénomène de réverbération qui prolonge et renforce l'intensité du son, comme Bacon l'avait déjà bien décrit. Gassendi poursuit en relevant d'autres propriétés des échos, tel que cette remarque :

Il faut remarquer en second lieu, que si l'on est loin du corps sonnant, et proche du réfléchissant, on n'entend qu'un seul son, et qui semble venir du corps réfléchissant ; parce que le son direct, et le réflexe frappent l'ouïe sans aucun intervalle sensible.

A la même époque où Gassendi écrivait ces lignes, vers 1640 en Italie, se développe un mouvement d'inspiration atomiste notamment à Pise, dont Bérigard est un des animateurs. Dans *Circulus Pisanus*, il développe quelques théories sur l'audition et parle ainsi de l'écho<sup>277</sup> :

In echo species illae soni incidentes in corpus solidum et cavum resiliunt, et vocem jam auditam ad aures referunt multiplici interdum repercussu, perinde ac colorum imagines e speculis reflecti solent.

[Dans l'écho, ces simulacres de son venant à tomber sur des corps solides et creux sautent en arrière, et renvoient la voix déjà entendue vers l'oreille par une répercussion parfois multiple, de même que les images des couleurs se réfléchissent d'ordinaire dans les miroirs.]

La définition de l'écho est ici assez conventionnelle et fidèle à celle de Gassendi, mais l'emploi d'un vocabulaire typiquement atomiste l'est moins. C'est ainsi que '*species*' et '*imagines*' ponctuent le chapitre traitant de l'audition, ainsi que les verbes '*resilere*' et '*referre*' qui s'emploient plutôt lorsqu'on évoque des

<sup>275</sup> *Id.* Gassendi, 1649, p. 274 - Bernier, 1674, p.369.

<sup>276</sup> *Id.*, p.369.

<sup>277</sup> Claude Bérigard, *Circuli Pisani, seu de veterum et peripatetica philosophia dialogi*, Udine, 1643, *De auditu*, p. 97-100.



corps. Les adeptes de cette philosophie avaient pour habitude de ne jamais parler directement de corpuscules ou d'atomes, mais d'employer cette terminologie un peu codée.

### Cartésiens sans Descartes

Descartes ne parle que très peu de la nature physique du son, et encore, on trouve seulement quelques phrases ici ou là dans sa correspondance. Dans l'ensemble les cartésiens adoptent la théorie des parties d'air qui se choquent successivement, c'est-à-dire la tendance scolastique qui s'inspire du *De audibilibus* de Straton-Aristote, par opposition aux thomistes qui sont plus proches du *De anima*.

On trouve cependant, dans une lettre d'octobre 1638, de Descartes répondant à Mersenne qui fait allusion à un récit du philosophe concernant des échos observés dans des champs d'herbes hautes, le passage suivant<sup>278</sup> :

Pour l'écho, j'admire que vous m'estimiez si simple que de penser que quelque Jean des vignes m'ait abusé. Car je vous assure que je l'ai observé aux champs, en mon propre jardin, où il n'y a personne aux environs qui puisse y faire aucune fourbe, ni en donner le moindre soupçon qu'on puisse imaginer. Et encore maintenant, il y a une planche de chicorée sauvage dans laquelle il répond un peu quand on frappe des mains. Mais les grandes herbes où il répondait le plus distinctement ont été coupées. Au reste la raison de cet écho me semble si claire que je ne doute point qu'on le puisse rencontrer en plusieurs autres lieux, comme par exemple dans les blés quand ils sont fort hauts et prêts à couper.

Mersenne semble-t-il mettait en doute le récit de Descartes, mais si ce dernier avait lu attentivement le récit rapporté dans le chapitre consacré à l'écho dans l'*Harmonie Universelle*, il saurait que celui-ci « reçoit comme habit toute sorte de couverture, car il ne dédaigne pas [...] les herbes, les saules, les marais, les vieilles masures, les jardins et les feuilles. ». Descartes n'a pas donné suite à la raison du phénomène qui lui semble si claire.

Dans une autre lettre, toujours à Mersenne, Descartes reprend l'analogie des ronds dans l'eau pour expliquer l'écho<sup>279</sup> :

L'objection qu'on vous a faite contre vos expériences de l'écho ne me semble d'aucune importance : car bien qu'il soit vrai que le son s'étend en cercles de tous côtés, ainsi que le mouvement qui se fait dans l'eau quand on y jette une pierre, il faut toutefois remarquer que ces cercles s'étendent beaucoup plus loin du côté vers lequel on jette la pierre ou vers lequel on s'est tourné en parlant, que vers son contraire ; d'où vient que l'écho, qui ne se fait que par la réflexion de la partie de ces cercles qui va le plus loin, ne s'étend que vers le lieu vers lequel elle se réfléchit.

Cette remarque est intéressante car elle introduit la notion de directivité de ce qu'on pourrait appeler un 'champ sonore', appellation très moderne, mais qui décrit assez correctement la réalité physique, par opposition aux 'rayons sonores'<sup>280</sup>.

Jacques Rohault (1618-1672) est considéré comme le physicien qui a popularisé les thèses de Descartes en ce qui concerne la compréhension du monde naturel. C'est avant tout un adversaire résolu de la science d'Aristote, suffisamment habile pour passer entre les filets tendus par la science dogmatique représentée alors par les savants Jésuites. Son ouvrage principal, de nombreuses fois réédité pendant près de soixante ans, est un *Traité de Physique* paru pour la première fois à Paris en 1671. Dans un article qui lui est consacré, Monette Martinet déclare que Rohault « se réclame en toute occasion d'Aristote et [il] réalise l'exploit de couler dans un monde aristotélécien un contenu spécifiquement cartésien. »<sup>281</sup> On peut ajouter que dans plusieurs de ses chapitres, il monte habilement les Scolastiques contre Aristote, renvoyant ainsi dos à dos les lourds piliers de la Connaissance. Le chapitre qu'il consacre au son comporte plusieurs pages très claires sur ce qu'on aurait pu attendre de Descartes en la matière. Rohault réfute tout d'abord les thèses aristotéliennes, puis scolastiques, par quelques propos polémiques et un ou deux aphorismes (« Nous aimons donc mieux dire que le son consiste dans une espèce particulière de mouvement de l'air, que non pas de dire avec Aristote, qu'il consiste dans le mouvement d'une espèce particulière de corps. »). Il prend ensuite quelques exemples très concrets de sons, une cloche, une viole, un verre qui tinte, un choc sur une pièce de bois, et énonce une définition<sup>282</sup> :

<sup>278</sup> René Descartes, Correspondance, ed. Cousin, Paris, 1824, t VII, p. 452.

<sup>279</sup> *Idem*, p. 409.

<sup>280</sup> Commentaire personnel : Il est vraiment dommage que Descartes n'ait pas poursuivi ses recherches sur la physique des sons, mais on pourrait dire la même chose de Galilée, de Huygens, et même de Newton...

<sup>281</sup> Monette Martinet, Jacques Rohault, in *Cahiers d'histoire et de philosophie des sciences*, 14, 1986, pp.89-132, p.95.

<sup>282</sup> Jacques Rohault, *Traité de physique*, Paris, 1671, ed. Guillemin, Lyon, 1696, p. 278.

Il n'est pas mal aisé de déterminer quel doit être le mouvement de l'air pour produire en nous le sentiment du son. Car il est évident que ce mouvement de l'air est nécessairement tel que les tremblements des corps résonants sont capables de produire en lui, c'est-à-dire que l'air doit bouillonner et même en sautillant se diviser en un nombre innombrable de petites masses qui se meuvent d'une très grande vitesse en tremblant et se froissant les unes et les autres. En sorte qu'il en est à peu près de l'air comme d'une liqueur qu'on voit frémir sur le feu avant que de bouillir tout à fait. Ce qui se confirme de ce qu'on remarque un mouvement presque tout pareil dans l'eau d'une cuve, dans laquelle on remue le plus vite que l'on peut un bâton à qui l'on fait faire plusieurs allées et venues. Car les allées et les venues de ce bâton sont semblables à celles des cordes d'un luth, sinon qu'elles sont incomparablement plus grandes et qu'elles se font plus lentement.

Fidèle dans le style et la méthode à son maître Descartes, Rohault use abondamment de la comparaison, et c'est ici pertinent puisque le son est de nature invisible. On passe donc des tremblements aux bouillonnements puis aux sautilllements des petites masses d'air. Puis le frémissement sur le feu de la liqueur fait place au bâton qu'on remue dans l'eau avant de revenir aux sons avec le luth.

Mais l'essentiel est de comprendre la théorie à laquelle Rohault se rattache, celle des parties d'air qui se choquent entre elles.

Comme d'autres savants, Rohault fait quelques 'expériences de pensée', comme celle-ci<sup>283</sup> :

L'on doit aussi juger que si le vent emporte l'air vers un certain côté, le tremblement auquel consiste le son parviendra plus tôt de ce côté qu'à l'opposite. Aussi expérimente-t-on qu'on entend plus tôt un coup de canon, et généralement tout autre bruit au-dessous du vent que l'on ne le fait au-dessus. Et même il se pourrait faire que l'air se meut si vite que ses parties fuiraient de nous à proportion que le son s'étendrait et ainsi on ne le pourrait en aucune façon entendre.

L'indulgence est accordée à Rohault pour avoir subtilement soulevé que si le vent atteint la vitesse du son, il est possible qu'on n'entende plus ce son. Il est assez rare que le vent atteigne une vitesse suffisante pour qu'on perçoive son influence (120 km/h pour une variation de vitesse de 10%), mais il s'agit ici d'une anticipation de ce qu'on nommera bien plus tard le 'mur du son'. Cependant Rohault aurait pu se référer à Mersenne et Gassendi qui avaient tous deux bien établi que le vent n'avait qu'une influence minime sur la vitesse de propagation du son.

Voici comment Rohault introduit, avec pédagogie, le phénomène de l'écho<sup>284</sup> :

Le son s'étendant en rond de tous côtés, c'est-à-dire comme du centre d'une sphère vers sa superficie, il peut arriver que les parties d'air qui sont en état de transmettre leur mouvement à d'autres plus éloignées, rencontrent quelque corps dur qu'elles ne peuvent ébranler. Ce qui les doit en quelque façon faire réfléchir vers le côté opposé, et ainsi faire qu'elles redonnent leur mouvement aux parties de qui elles l'ont reçu, et celles-ci à d'autres. De façon qu'il se doit faire un nouveau trémoussement d'air au lieu même où il a commencé et où il y a déjà peut-être quelque temps qu'il a cessé. Et par conséquent l'on y doit entendre pour la seconde fois le même son qu'on y a ouï auparavant. Et c'est ce son ainsi redoublé que l'on appelle un écho.

Comme pour celle de Descartes, cette modélisation, qui paraît parfaite, souffre de quelques imperfections qui ne rendent pas compte de certaines caractéristiques et de certains événements. On peut relever l'absence d'informations sur la conservation du timbre, et surtout sur le résultat d'une rencontre fortuite entre deux parties d'air qui proviennent de deux sons différents, et en particulier lors d'un écho. Rohault fait bien de dire « qu'il se doit faire un nouveau trémoussement d'air au lieu même où il a commencé et où il y a déjà peut-être quelque temps qu'il a cessé. ». Car en effet, si le trémoussement d'air du son initial vient à rencontrer celui de l'écho, qui lui est tout à fait semblable, on ne devrait plus rien entendre...

Rohault a bien prévu le cas de deux sons différents qui « agissent sur l'air en même temps »<sup>285</sup> :

Ils lui doivent imprimer un mouvement composé des deux qu'ils produiraient s'ils agissaient séparément. Et l'air doit ensuite ébranler d'une telle manière l'organe de l'ouïe qu'il en résulte une sensation qui participe des deux que ces corps exciteraient par des impressions séparées.

Rohault poursuit en décrivant ce qui se passe lorsque les chocs sont commensurables, c'est-à-dire la coïncidence des coups qui sont à l'origine des consonances, selon une théorie maintenant ancienne élaborée en Italie au siècle précédent. Cependant, en se référant à la sensation, ce qui permet d'éviter la physique, Rohault ne décrit pas réellement le processus de composition de ces chocs, notamment en prenant quelques cas

<sup>283</sup> *Id.* p. 283.

<sup>284</sup> *Id.* p. 283.

<sup>285</sup> *Id.* p. 285.

particuliers, tels que le choc face à face, le choc latéral, le choc arrière, etc., et entre des parties d'air de formes et de dimensions différentes. Alors, comme souvent, Rohault invoque la désormais classique et scolastique analogie<sup>286</sup> :

La propagation du son se peut assez proprement comparer à ces cercles qui se font dans l'eau quand on y a jeté une pierre [...]

En dépit du ralliement à cette représentation consensuelle, le modèle des parties d'air qui se choquent se heurte au même obstacle que le modèle corpusculaire des atomistes, c'est la résolution du problème des percussions mutuelles de ces parties ou corpuscules.

### Les corps qui retiennent le son : Otto Von Guericke

Otto Von Guericke devenu célèbre grâce à son expérience sur le vide à Magdeburg en 1653 a écrit, dans le *De vacuo spatio*<sup>287</sup>, sur de nombreux sujets. Il consacre trois pages au son et développe une théorie très originale à propos de l'écho :

Sonus non diffunditur in momento, ut lux, sed successive, sphaerice tamen ut lux, et reflectitur etiam ut virtus lucens, ut et virtus impulsiva, quam reflexionem communiter Echo vocamus, quanquam improprie, quia saltem resonantia, vel soni reflexio aut repercussio est.

Etiam si enim sonus, incidens in objectum vel objecta, pro qualitate diversorum corporum, et situ loci diversi modo reflectatur, et inde quasi Echo percipiatur, tamen propria est resonantia et soni percussio, non echo.

Nam Echo est virtus sonans, in corpore ad recipiendum sonum cum omnibus suis qualitatibus, habili, recepta, et iterum cum omnibus suis qualitatibus reddita.

Resonantia vero seu resonabilitas, est reflexio soni a corpore inhabili ad virtutem sonantem ; ideoque merito reflectitur, (non autem cum omnibus qualitatibus ut in echo comperimus) sed diversimode, pro qualitate scil. Loci et corporum a quibus reflectitur.

Sicut itaque videmus aliam reflexionem lucis esse, quae fit a corpore opaco tanquam inhabili recipiendae virtuti lucis ; et aliam reflexionem lucis esse a corpore pellucido tanquam habili ad recipiendum lucem. Sic quoque alia reflexio soni est quae fit a corporibus inhabilibus ad recipiendum in se soni virtutem ; et alia reflexio est quae fit a corpore habili, echoque proprie vocatur.

[Le son ne se propage pas en un instant, comme la lumière, mais progressivement, du reste de façon sphérique comme la lumière, et se réfléchit comme l'énergie lumineuse, et comme l'énergie impulsive, réflexion en général nommée écho, d'ailleurs improprement car il s'agit plutôt de la résonance, ou de la réflexion ou répercussion du son.

En effet, même si le son, venant frapper un obstacle ou des objets placés devant, se réfléchit de différentes manières selon la qualité des divers corps et l'arrangement du lieu, ce qui fait que nous le concevons comme un quasi écho, il s'agit cependant à proprement parler de la résonance et de la percussio du son, pas d'un écho.

Car l'écho sonore est l'énergie reçue dans un corps capable de conserver le son avec toutes ses qualités, et restituée, à plusieurs reprises, avec toutes ses qualités.

Quant à la résonance, ou la capacité à résonner, c'est la réflexion du son par un corps inapte à l'énergie sonore ; et pour cette raison [le son] se réfléchit effectivement, (pas toutefois avec toutes ses qualités, comme nous l'avons expliqué pour l'écho), mais de diverses façons, selon bien entendu la qualité du lieu et des corps qui le réfléchissent.

C'est pourquoi en quelque sorte nous considérons une réflexion de la lumière être ce qui se fait par un corps opaque qu'on pourrait qualifier d'inapte à conserver l'énergie de la lumière, et l'autre réflexion de la lumière, par un corps transparent qu'on pourrait qualifier d'apte à conserver la lumière. De même, une réflexion du son est faite par des corps inaptes à conserver en lui l'énergie du son, et l'autre réflexion est faite par un corps apte, et elle est appelée à juste titre écho.]

Nous sommes ici en présence d'une modélisation dont l'origine est toute scolastique, puisque le phénomène particulier du son qui est la réflexion par l'écho trouve sa cause dans le corps sonore et non dans les propriétés de propagation du son lui-même. Il existerait donc des matériaux aux vertus mystérieuses qui seraient capables de conserver le son un court instant, et de le restituer en plusieurs fois avec toutes ses qualités. L'idée

<sup>286</sup> *Id.*, p. 282.

<sup>287</sup> Otto von Guericke, *Experimenta nova (ut vocantur) Magdeburgica de vacuo spatio*, Amsterdam, 1672, p. 138-140.

est originale, mais elle demande à être vérifiée par l'observation. Otto Von Guericke, en outre, fait une nette distinction entre l'écho véritable, qui conserve les qualités du son, et la réverbération, qu'il appelle résonance, qui est plus ordinaire et qui se manifeste par des réflexions sur les corps communs nous environnant. On peut imaginer que cette distinction permet d'entretenir l'imprécision quant à ces matériaux gardant le son qui seraient finalement semble-t-il assez rares dans la nature. Von Guericke était un proche de Gaspar Schott qui avait une certaine tendance à élaborer des théories mystérieuses où la magie naturelle avait toute sa place. Rappelons que Schott, également ami et collaborateur de Kircher, faisait partie de la Compagnie de Jésus. Encore une fois, on a affaire à un savant jésuite maniant la mystification probablement dans le but de manipuler les fidèles.

Néanmoins Otto Von Guericke appuie son hypothèse sur l'observation des échos qui se produisent dans les forêts et dans diverses situations où il ne se trouve aucun corps solide et lisse, comme l'exigent la plupart des théories sur l'écho à cette époque. Et il cite également la propriété de la 'pierre de Bologne', le phosphore, qui possède cette capacité de conserver la lumière un moment.

Nous sommes cependant en 1672 lorsque l'ouvrage paraît, et même si Von Guericke l'a écrit plus de dix années auparavant, cette théorie est un peu décalée par rapport aux avancées de la science à cette époque, notamment en ce qui concerne la pneumatique.

### **L'écho produit par une cavité : Hautefeuille**

Jean de Hautefeuille (1647-1724), la particule a sans doute été ajoutée car il était fils de boulanger, est un ecclésiastique du bas clergé, praticien de la physique avant d'en être un théoricien. C'est probablement une des raisons de son maintien à l'écart de la communauté scientifique. Mécanicien horloger, il n'a jamais pu entrer à l'Académie des Sciences, malgré ses recherches et ses publications. Les autres raisons de cet ostracisme étant son absence de connaissances académiques, il n'avait pas fréquenté les 'grandes écoles', et surtout le différend qui l'a opposé à Huygens à propos de l'invention du ressort spiral des montres vers 1673, à une époque où ce grand mathématicien-physicien-astronome, académicien déjà célèbre, s'est abaissé à ces querelles de boutiquier non seulement avec Hautefeuille, mais également avec Hooke. Hautefeuille dut donc attendre le début du XVIII<sup>e</sup> siècle pour qu'on lui accorde une attention méritée. Il n'était peut-être pas un génie, mais ses recherches, très pratiques tout en respectant les avancées scientifiques, étaient tout à fait dignes de figurer parmi celles des grands. Hautefeuille n'a sans doute pas mérité la description qu'en fait Huygens, qu'on ne savait pas si méprisant et si dépourvu de grandeur<sup>288</sup> : «...un petit abbé sans abbaye, qui est éternellement à proposer des inventions qui n'ont point d'effect.. ».

Hautefeuille publie plusieurs essais sur des sujets divers, et l'acoustique est une science qui le passionne particulièrement. Dès 1674, il publie une *Explication de l'effet des trompettes parlantes*, c'était alors un sujet très discuté dans la communauté scientifique, et ce traité est assez pertinent. En 1715, il propose une *Dissertation sur l'écho* à l'Académie des Sciences de Bordeaux qui venait de proposer un concours sur le thème de l'explication raisonnée du phénomène. Hautefeuille obtient le prix, et son essai est publié en 1718. Il est cependant probable que les recherches sur ce sujet dataient de plusieurs décennies. Ce texte complètement méconnu met l'accent sur plusieurs points pratiques quant aux conditions de production de l'effet<sup>289</sup>.

Après avoir rapidement réfuté les thèses aristotéliennes, scolastiques et celles développées par Kircher et Schott, Hautefeuille déclare, à propos de la comparaison convenue de l'écho avec une balle rebondissante<sup>290</sup> :

Cette comparaison est assez juste si on n'a égard qu'au simple son, mais elle ne convient point du tout à l'écho, la seule réflexion des voix et des sons n'en pouvant produire aucun.

Puis :

[...] pour la production de l'écho, ils [Fromondus, Kircher, Schott, Perrault] n'ont point établi d'autre cause que la réflexion des sons qui seule ne suffit pas.

<sup>288</sup> Christiaan Huygens, *œuvres complètes*, Soc. Hol. des Sciences, La Haye, Nijhoff, 1937, t 8, Correspondance, lettre à son frère Constantin, 21 août 1683.

<sup>289</sup> Hautefeuille a écrit un grand nombre de courts essais sur des inventions diverses, telles que la Pendule perpétuelle (1678) ; L'art de respirer sous l'eau (1692) ; Nouveau moyen de trouver la déclinaison de l'aiguille aimantée avec une grande précision (1683) ; Microscope micrométrique, gynomon horizontal, et instrument pour prendre les hauteurs des astres (1703) ; Problèmes d'horlogerie (1719) ; Nouveau système du flux et du reflux de la mer (1719). Il a par ailleurs écrit plusieurs textes sur l'acoustique réunis en un volume : Jean de Hautefeuille, *Problème d'acoustique curieux et intéressant*, Varin, Paris, 1788.

<sup>290</sup> Jean Hautefeuille, *Dissertation sur la cause de l'écho*, Brun, Bordeaux, 1718, p.8.

« La seule réflexion des sons ne suffit pas » est une nouveauté pour tous ceux qui pensent que l'écho peut se résumer à une réflexion selon l'égalité des angles d'incidence et de réflexion. Hautefeuille est en train de discerner ce qui fait que, malgré une réflexion indubitable, l'écho ne se fait pourtant que rarement et dans des conditions particulières encore inconnues, ce qui avait d'ailleurs conduit Mersenne à défier quiconque d'en produire d'artificiels. En outre, Hautefeuille remarque, et c'est rare, que l'écho n'a pas besoin de surface réfléchissante solide et polie :

Ceux [les corps] qui sont mous et fort poreux ne laissent pas que de réfléchir les sons. L'expérience fait connaître que les arbres et les toits, couverts de neige et de givre, réfléchissent la voix et produisent des échos, mais plus faiblement.

Cette observation, qu'on trouve ça et là chez les auteurs qui parlent de l'écho, est importante parce qu'elle est un indice de l'inexactitude de l'hypothèse catoptrique. En effet celle-ci ne fonctionne que si les surfaces réfléchissantes sont solides et suffisamment dures et polies pour faire obstacle aux 'rayons sonores'. Pourtant le mystérieux auteur du traité sur l'écho inclus dans la proposition XXVI de l'*Harmonie Universelle* dit bien que l'écho « ne dédaigne pas les murailles et les voûtes décrépies et polies, les herbes, les saules, les marais, les vieilles mesures, les jardins et les feuilles. ». On a vu que Descartes avait fait la même observation.

Pour Hautefeuille, la condition déterminante de la production d'un écho est que les réflexions soient multiples et concentrées dans un foyer, c'est-à-dire lorsque la surface réfléchissante présente une courbe conique, ellipse, hyperbole mais surtout parabole. Bien entendu la nature ne propose pas souvent exactement ce genre de courbes, mais il suffit que la concavité de la surface permette la focalisation pour que l'écho se produise<sup>291</sup> :

Tous les corps de la nature sont capables de réfléchir le son, de le réunir dans un foyer et de produire l'écho.

[...] Si les corps qui réfléchissent la voix sont disposés de telle sorte qu'ils renvoient les ondulations de l'air parallèles, il ne s'en fera aucune réunion, et par conséquent point d'écho, qui est le contraire de ce que tous les philosophes ont écrit jusqu'à présent.

Si ces corps les réfléchissent *convergens*, elles produiront un foyer, et la voix s'entendra une seconde fois.

En effet, et Hautefeuille est clairvoyant, le problème de l'écho n'est pas tant dans la capacité de réflexion, somme toute assez banale, mais, pour une certaine configuration, dans la capacité d'obvier à l'atténuation du son avec la distance. Compte tenu que l'atténuation est proportionnelle au carré de la distance, en diffusion sphérique, il n'existe que peu de moyen pour réduire cette atténuation, ou pour simuler une amplification. La focalisation en est un, l'effet de canalisation, dans lequel la surface de pression est assimilée à un plan en est un autre. Peu importe la nature, la matière et le polissage de la surface, pour faire un écho il faut que le son réfléchi, outre qu'il soit à une assez grande distance, ne s'atténue pas, ou peu<sup>292</sup> :

Tous les savants conviennent que la modification du mouvement de l'air qui produit les sons et la voix est peu connue, parce qu'il ne tombe point sous le sens de la vue, et que l'oreille ne peut l'apercevoir à cause de la promptitude et de la vitesse du ressort de l'air.

Il n'est pas nécessaire, pour avoir une idée claire et distincte de la véritable cause de l'écho, de connaître cette modification de l'air qui produit la voix et les sons, il suffit de savoir que le mouvement de l'air, quel qu'il soit, se trouve exactement le même dans le foyer des rayons sonores, et tel qu'il était au sortir de la bouche : que, de chaque point physique de l'air ému, il s'écarte à la ronde des agitations dont, plusieurs venant à se réunir, elles forment une seconde voix semblable à la première, toutes choses supposées égales.

En mettant ainsi l'accent sur cette propriété de l'écho encore mal définie, Hautefeuille fait progresser cette science des sons, mais sa faible notoriété va longtemps retarder les avancées dans ce domaine, et les 'rayons sonores' ont encore un bel avenir...

Néanmoins la publication du traité de Hautefeuille est contemporaine d'une rupture dans l'étude de la physique des sons. En effet, là où cette physique est essentiellement fondée sur l'observation, parfois sur la mesure, et rarement sur l'expérience, les savants consignent ces observations et élaborent des hypothèses. L'écho avait toute sa place comme sujet d'étude privilégié par la manifestation de plusieurs propriétés du son telles que la réflexion, le temps de propagation, et finalement la nature même du mouvement du son. A la fin du XVII<sup>e</sup> siècle, quand Hautefeuille écrit les premiers éléments de son traité, l'écho n'est plus un sujet d'étude qui permet de comprendre le son, mais c'est un phénomène comme d'autres, et désormais on l'étudie à ce titre :

<sup>291</sup> *Id.* p.11.

<sup>292</sup> *Id.*, p.21-22.

Avec l'avancée considérable que représente la pneumatique, l'étude du son se transforme, et l'expérimentation prend toute la place qu'elle n'avait pas auparavant. La production du vide permet de disposer réellement du matériau, l'air, et de machines qui le manipulent et le mesurent. En ce sens, l'expérience de Boyle, plus qu'un simple exercice sur les effets du vide, représente une avancée importante dans l'étude de la nature du son. Dès lors, les théories scolastiques ne peuvent plus être défendues, le son est forcément un mouvement d'air. De plus, comme l'air est compressible et extensible, ce mouvement est très localisé, ce n'est pas un mouvement d'une masse d'air mais le mouvement d'un transfert local d'énergie, d'une quantité de mouvement, qui affecte chaque partie d'air, si on peut encore parler ainsi, en poussant la partie d'air conjointe. On doit à Huygens la formulation claire de ce mouvement qu'il appelle 'onde'. Pour en arriver là, il a fallu que plusieurs savants, en étudiant la nature de la lumière, élaborent lentement une théorie à partir de la représentation des ronds dans l'eau.

### 3 - Le temps du son : la vitesse du son

La notion de vitesse est peu présente chez les Scolastiques. Tandis que le mouvement est l'occasion de nombreux commentaires des écrits d'Aristote, le temps est peu appréhendé par les physiciens, et donc la vitesse reste un sujet un peu mystérieux. On considère généralement, dans la physique médiévale, que la *velocitas* correspond avant tout à une distance. On la suppose parcourue dans une durée fixée, mais la mesure des durées est imprécise, et l'expression mathématique d'un rapport de deux grandeurs hétérogènes semble inacceptable. Néanmoins, les mécaniciens de l'Epoque Moderne commencent à aborder la vitesse dans le cadre de l'étude du mouvement et considèrent même bientôt ses variations.

Les Aristotéliens considéraient que le son n'est pas un mouvement mais une 'qualité successive' sans durée. Si donc on observe un décalage entre la vision et l'audition d'un choc à distance, c'est parce que la vue est plus sensible que l'ouïe. Lorsque les savants quittent leurs bibliothèques pour observer le monde et la nature, ils ne peuvent plus accepter cette explication. A partir du moment où les physiciens admettent que le son est un mouvement, même si on ne sait pas exactement de quoi il s'agit, il devient nécessaire d'en mesurer la vitesse et ses éventuelles variations. Loin de s'embarrasser, comme les Aristotéliens, de la cohérence de leurs observations avec les textes, ils avancent par l'expérience. On note à ce sujet l'humilité d'un Mersenne qui exprime ses limites mais n'en consigne pas moins le résultat de ses constatations, qu'il soumet à la communauté des savants pour construire lentement la 'vérité'<sup>293</sup> :

[...] et si quelqu'un fait des expériences plus exactes que les nôtres, il les pourra suivre, notre intention n'ayant jamais été que l'on suive autre chose que la vérité, en quelque lieu qu'elle se rencontre.

Pour mesurer la vitesse du son, il faut déterminer les instants d'émission et de réception du son, ainsi que mesurer le plus précisément possible la durée entre ces instants. Pour mesurer la durée de propagation d'un son, il est nécessaire qu'il se propage sur une étendue suffisante pour être appréciée. Et donc, il faut bien entendu connaître avec précision la distance entre le point d'émission et le point de réception. Il faut également pouvoir synchroniser à distance les instants sur une même horloge. Il faut enfin pouvoir mesurer une durée. Au XVIème siècle, la mesure des courtes durées est empirique et peu précise, on dispose des clepsydres ou des sabliers, des mouvements rythmiques comme le poulx, des tours de bras circulaires ou même le rythme musical. Au début du XVIIème siècle on utilise le pendule dont la longueur de trois pieds et demi détermine la seconde. L'histoire de la mesure de la vitesse, et du son en particulier, suit un chemin parallèle à l'histoire de la mesure du temps.

La mesure de la vitesse du son sera donc d'abord une question de méthodologie et un problème technique, plus qu'une spéculation scientifique. Cependant on se posera, de temps à autres, la question de la variabilité selon la distance, selon les caractéristiques du son transmis, ou selon les conditions environnementales.

#### Francis Bacon : le flambeau et la cloche

Deux parties importantes ('centuries' II et III) du *Sylva sylvarum* de Francis Bacon, publié en 1627, peu après la mort de son auteur, sont consacrées aux sons. Ce texte reprend et développe un opuscule non édité et sans doute écrit vers 1608, *Historia de sono et auditus*. Dès le début du texte, Bacon décrit le son comme un mouvement, engageant ici le conflit avec les aristotéliens. Bacon étudie deux aspects de la durée propre aux sons, le temps d'extinction après l'arrêt du choc sonore, et le temps de propagation. Il observe tout d'abord que plus le son est intense, plus il dure longtemps. Ceci l'amène à proposer que le son ne se propage pas instantanément, contrairement à ce qu'affirment tous les textes anciens. Francis Bacon suggère alors, vers 1608, donc, d'effectuer une expérience pour mesurer la vitesse du son. Cette expérience n'a semble-t-il pas été réalisée, Bacon n'en fait pas mention et ne donne pas de résultat.

De nuit, un homme se tient dans un clocher, un autre homme dans la plaine, à une distance connue, d'un mille par exemple. On allume un flambeau dont on cache la lumière par un rideau. Le sonneur lève le rideau à l'instant où il percute la cloche. L'observateur à distance décompte alors le temps écoulé entre l'apparition du flambeau et la perception du son<sup>294</sup> :

Stet homo in campanili, noctu ; stet alter in plano, ad distanciam forte milliaris, aut quam procul campana exaudiri possit, habeatque paratam facem lucentem, sed co-opertam. Sonet campana in campanili; quam cito illa exaudiat ab illo altero qui stat in plano, attollat ille facem;

<sup>293</sup> Ces mots sont les derniers du troisième livre de l'Harmonie Universelle parue en 1636.

<sup>294</sup> Francis Bacon, *Historia soni et auditus*, env. 1608, in *The works of Francis Bacon*, ed. Spedding, 1859, t. 3, p. 677.

per hoc, ex spatio temporis inter campanam pulsam et facem visam, deprehendi possunt momenta motus soni ab eo qui stat in campanili.

Dans *Sylva sylvarum*, Bacon imagine l'emploi d'une pièce d'artillerie à la place de la cloche et du flambeau<sup>295</sup> :

209. Mais, pour déterminer avec exactitude le temps que le son emploie à parcourir un espace connu, il faudrait faire l'expérience suivante. Soit une tour élevée sur laquelle est une cloche, et tout auprès un homme qui tient d'une main un marteau, et de l'autre un flambeau masqué par un rideau ; et que son aide se tienne dans la campagne à la distance d'un mille. Cela posé, que le premier, au moment même où il frappe sur la cloche, montre le flambeau ; et que celui qui est dans la campagne, détermine en comptant les battements de son pouls, le temps qui s'écoule entre le moment où il aperçoit le flambeau, et celui où il entend le son de la cloche ; car il est d'ailleurs certain que la lumière franchit cette distance en un instant. On pourra faire cette même expérience plus en grand, je veux dire, en employant une lumière d'un grand volume, et une fort grosse cloche, ou une grosse pièce d'artillerie.

On est ici dans une expérience typique de mesure, c'est-à-dire une comparaison de deux grandeurs. D'une part une valeur connue, ici la lumière dont la propagation est considérée instantanée ou très rapide, et d'autre part une valeur inconnue, la durée de propagation du son. Le référentiel commun aux deux grandeurs est la simultanéité des instants où se produisent les deux phénomènes, le flambeau occulté et le coup sur la cloche. On établit une constante arbitraire et mesurée, la distance entre le point d'émission et le point de réception. L'instrument de mesure est ici le pouls supposé pouvoir produire un dénombrement fiable des courtes durées.

Cette proposition sera reprise et sa précision améliorée pendant plus de deux siècles pour mesurer la vitesse du son.

### Mersenne : la durée et la distance d'une syllabe

Pour Mersenne, le son est un 'mouvement d'air battu', ce qui explique à la fois le temps de propagation et sa diffusion sphérique, puisque l'air est homogène. De plus :

Le Son ne se communique pas dans un moment, comme fait la lumière, selon toute son étendue, mais dans un espace de temps. [...] Mais le Son ne peut remplir la sphère de son activité que dans un espace de temps qui est d'autant plus long que le lieu où se fait le Son est plus éloigné de l'oreille, comme l'on expérimente en plusieurs manières, et particulièrement lors que l'on voit que la hache ou le maillet du bûcheron et des autres qui frappent sur quelque corps, a déjà frappé deux coups lors que l'on oit le premier coup, ce qui arrive quand on est éloigné de cinq ou six cens pas ou davantage.

Puisque le son 'prend du temps' dans son mouvement pour atteindre l'organe de l'ouïe, et c'est une idée nouvelle, il est donc doté d'une certaine vitesse, que Mersenne se propose de mesurer grâce à l'expérience suggérée par Bacon : lors d'un tir au canon, on mesure la durée entre la vue de la flamme et la perception du son à grande distance<sup>296</sup>.

Une première difficulté méthodologique se pose, comment s'assurer que la vitesse est constante dans tout le processus de propagation<sup>297</sup> :

Or il faudrait faire plusieurs expériences pour savoir si la tardiveté du Son suit la grandeur des espaces; par exemple, si le Son qui est fait à deux mille pas loin, ne s'entend que deux secondes minutes après qu'il a été fait, et s'il garde toujours une même proportion en ses tardivetés.

[...] il faut premièrement s'éloigner d'un quart de lieue, secondement d'une demie lieue, et puis de trois quarts, et finalement d'une lieue, afin de voir si chacune de ces quatre distances égales retarderont le Son autant l'une que l'autre.

Or il faut répéter plusieurs fois cette expérience, et particulièrement lorsque le vent est favorable et contraire, et que l'air est plein de brouillards et de vapeurs, ou qu'il est calme, clair et serein. Et après il faut observer la différence de la vitesse du Son dans ces différences de temps, et remarquer si le Son va plus vite de haut en bas, que de bas en haut, en plaine campagne qu'à travers les montagnes ou les vallées, sur l'eau des rivières ou de la mer que sur la terre, et cetera car les différentes situations apportent de grandes différences aux Sons.

Mersenne relate alors les observations faites par un Capitaine de ses amis au Siège de La Rochelle (1628). A plusieurs reprises, sur des sites différents et par des conditions atmosphériques diverses, ce Capitaine

<sup>295</sup> Francis Bacon, *Sylva sylvarum*, trad. Lasalle, Frantin, Dijon, 1803, centurie III, 209.

<sup>296</sup> Mersenne, *Harmonie universelle*, livre I, prop. VIII.

<sup>297</sup> *Ibidem*.



a mesuré le délai entre la mise à feu d'un canon ou d'un mousquet, visible à distance par la flamme qui signale la mise à feu, et la perception du son. Les mesures sont, bien entendu, peu précises, celles du temps comme celles des distances. Mersenne énonce alors quelques hypothèses sur les conditions de température, de vent, d'heure de la journée, et leur influence sur la vitesse du son.

Puis Mersenne s'interroge sur le mouvement du son en rapport avec celui de la corde vibrante, et compare leurs vitesses<sup>298</sup> :

[...] d'où il faut, ce semble, conclure que ce Son qui va si vite, ne peut être le mouvement de l'air qui est fait par le battement de la corde, et qui n'a point d'autre vitesse que celle de la corde,

Cette distinction est importante car elle dissocie le mouvement du corps sonore, son 'tremblement', du mouvement du son lui-même dans sa propagation. Ce point n'avait pas encore été exprimé par les savants qui s'étaient jusqu'alors penchés sur la question. C'est peut-être grâce à la correspondance que Mersenne entretenait avec Descartes qu'il a élaboré cette idée. En effet, dans une lettre de 1633, Descartes, à propos de la propagation du son, distingue ces deux types de mouvements<sup>299</sup> : « [...] pendant le temps que l'air a pu se mouvoir depuis C jusqu'à D, le son a passé depuis C jusqu'à E ».

Pour les Scolastiques, il n'y a qu'un seul mouvement, celui qui 'précède' le son, puisque c'est celui du choc des corps sonores. C'est d'ailleurs ici le point le plus confus de la théorie scolastique du son. On ne pouvait pas sortir de cette confusion tant que ces deux types de mouvements, le mouvement de 'tremblement' du corps sonore communiqué à l'air et le mouvement de propagation du son, n'avaient pas été identifiés. La manifestation de ces mouvements, concrète pour l'un, le tremblement, parce qu'il est perçu, mais abstraite pour l'autre, va être très longue à se mettre en place. Ce deuxième type de mouvement qui semble-t-il ne déplace pas de matière, est encore inconnu et nécessite une représentation. La mesure de sa vitesse, au-delà de la simple curiosité, est la première phase de cette démarche de représentation. Si on mesure une vitesse et qu'on la caractérise au moyen de paramètres, notamment sa variabilité ou sa constance selon les conditions, on identifie un mouvement. La vitesse du son est la manifestation de l'existence de son mouvement.

Comme Francis Bacon, Mersenne n'effectue pas l'expérience de la mesure de vitesse en utilisant le canon, sans doute à cause des moyens qu'elle exige, même s'il utilise les observations effectuées à La Rochelle.

A la fin du livre I qui traite de la nature physique des sons, Mersenne aborde longuement les phénomènes d'écho, et à cette occasion, revient sur la mesure de la vitesse du son. En effet, lors de ses nombreuses expériences sur les échos, il était devenu familier de ces méthodes et la difficulté que présente la mesure de la vitesse est en passe d'être résolue. Dans la proposition XVII, consacrée à l'écho, Mersenne aborde justement la mesure de la distance qu'un écho peut parcourir. Voici le premier corollaire de cette proposition<sup>300</sup> :

L'on peut conclure quelle est la vitesse du Son par les expériences que l'on fait des Echos, car l'on prononce aisément deux syllabes l'une après l'autre, desquelles on entend l'Echo tandis que le poulx bat une fois, c'est-à-dire dans le temps d'une seconde minute. Or la voix fait nonante et six pas géométriques dans cet espace de temps, d'autant qu'elle va et revient deux fois par la ligne vocale d'une syllabe qui est de vingt-quatre pas géométriques ou environ: et conséquemment l'on peut dire que le Son fait cent pas géométriques dans une seconde minute, et deux lieues dans une minute d'heure, et cetera et qu'il ferait le tour de la terre dans soixante heures, qui valent deux jours et demi.

La méthode ne consiste pas à mesurer une durée correspondant à une distance déterminée à l'avance. Au contraire, à la suite de Biancani à qui il emprunte la méthode, Mersenne mesure la distance parcourue par le son dans une durée déterminée. La méthode du canon est différente, puisque la distance est fixe et la durée mesurée. Mersenne est astucieux, car il est plus simple pour lui, malgré l'imprécision, d'opérer avec une durée fixe, l'intervalle de deux battements de cœur. Cependant cette méthode, si elle permet de façon pratique d'effectuer des mesures relatives, parce que le poulx ne varie pas de façon importante pendant la durée des expériences, n'est pas adaptée aux mesures absolues puisque le poulx ne bat sans doute pas exactement la seconde comme il le suggère. Par la suite Mersenne utilisera le pendule de trois pieds et demi, référence admise par tous de la 'seconde-minute'. Et encore, Mersenne le précise d'ailleurs dans un corollaire, il ne faut pas lever le pendule trop haut, sinon il fait une seconde trop courte. En effet, la courbe tautochrone n'est pas l'arc de cercle, mais l'arc de cycloïde, et les mathématiciens travaillent activement la question à ce moment des expériences de Mersenne.

<sup>298</sup> *Ibid.*

<sup>299</sup> René Descartes, Lettre à Mersenne d'avril 1633, in *Correspondance*, éd. Cousin, Paris, Levrault, 1824,, t 6, p. 228.

<sup>300</sup> Mersenne, *Harmonie universelle*, livre I, prop. XXVII, corollaire I.

La méthode de Mersenne, inspirée de celle de Biancani commence par la mesure de la durée de prononciation d'une syllabe renvoyant un écho distinct. Cette durée est exprimée en mesure de longueur, ici le pas géométrique (qui fait 5 pieds). En effet, pour mesurer un écho, on compte le nombre de syllabes prononcées rapidement sur un rythme régulier, de façon que l'écho les renvoie sans intervalle entre la dernière syllabe prononcée et la première de l'écho.

Si on veut mesurer la vitesse, il convient de mesurer la distance parcourue par le son, qui est donc égale à deux fois la distance de la surface réfléchissante. Sachant qu'une syllabe correspond à 24 pas géométriques, selon Biancani, un écho de deux syllabes correspond à 48 pas pour l'aller et autant pour le retour, donc 96 pas géométriques, et Mersenne dit que c'est la distance parcourue par le son en une seconde. Ce résultat est très mauvais, Mersenne va s'en rendre compte plus tard. Le problème ne vient pas de la distance, mais de la durée. En effet, l'aller retour ne se fait pas ici en une seconde, mais en une demi-seconde. Mersenne a sans doute compté sa seconde (un battement de pouls) entre le début de la première syllabe prononcée et la fin de la dernière syllabe réfléchi, ce qui est incorrect car il faut mesurer la durée entre la fin de la dernière syllabe prononcée et la fin de cette dernière syllabe réfléchi. Cette durée est la moitié du temps total, donc une demi-seconde. Dans ce cas, le son parcourt, non plus 96 pas géométriques en une seconde, mais 192, ce qui fait 960 pieds ou 160 toises (environ 312 m/s)

En revanche, lorsqu'il entreprend la rédaction du livre III, Mersenne est en mesure de procéder à des nouvelles mesures grâce à la méthode de l'écho précédemment décrite, dans des conditions favorables, et cette fois avec un pendule de trois pieds et demi, qui fait une seconde par demi-période (une seconde pour un aller retour)

Mersenne commence la proposition 21 du livre III par un avertissement<sup>301</sup> :

Il faut accommoder tout ce que j'ai dit de l'Echo, depuis la vingt-six jusqu'à la vingt-neuvième proposition du livre des Sons, suivant les observations plus particulières, que j'ai faites depuis en des lieux différents, lesquelles sont expliquées dans la proposition qui suit, et qui donne plusieurs choses qui n'avoient pas été remarquées.

Les conditions et la méthodologie de l'expérience sont précisées et, suivant l'usage à cette époque, Mersenne commence par énoncer le résultat<sup>302</sup> :

Il est certain que toutes sortes d'Echo qui répondent sept syllabes prononcées dans le temps d'une seconde minute, doivent être éloignées de 485 pieds de Roy, c'est-à-dire près de 81 toises.[...] Or cette mesure de l'Echo, ou de la réflexion de la voix et des autres bruits, est si assurée que toutes les expériences la confirment. Ce que l'on éprouvera aisément avec notre horloge à secondes minutes, [...] car elle marque une seconde minute pour la prononciation des sept syllabes par son premier tour, et la réverbération de l'Echo par son retour. Sur quoi il faut premièrement remarquer que l'Echo est toujours d'une égale vitesse en toutes sortes de temps, soit qu'il fasse du brouillard, ou que l'air soit clair et serein, ou que le vent soit à gré, ou contraire, ou de travers: car nous avons expérimenté plusieurs fois, et en plusieurs lieux toutes ces variétés.

En second lieu, [je dis] que les vents ou les autres impressions de l'air contraires à l'Echo l'affaiblissent, ou le rendent inutile, parce qu'il n'est pas entendu, encore qu'ils n'en empêchent nullement la vitesse.

Mersenne, outre la mesure de la vitesse du son, fait des remarques intéressantes déduites de sa méthode : l'égalité de durée entre le son direct et le son réfléchi, et l'insensibilité de la vitesse aux conditions atmosphériques.

Pour la mesure de la vitesse, à partir de cet endroit du texte, l'affaire se complique. Mersenne rappelle que Biancani a mesuré la distance pour prononcer une syllabe, il trouve 24 pas géométriques (prop. 27 du livre I) Mersenne, pour sa part avait obtenu 22 pas (le pas géométrique fait 5 pieds de Roy, donc 110 pieds pour une syllabe). Mersenne dit alors<sup>303</sup> :

En troisième lieu, [je dis] que la mesure précédente de l'Echo est plutôt trop longue que trop courte, et conséquemment que la distance de 69 2/9 pieds de Roy, (ou pour éviter la fraction) 69 pieds suffisent pour une syllabe prononcée dans la septième partie d'une seconde: de sorte qu'il faut reformer les mesures de l'Echo, dont j'ai parlé, depuis la vingt-sixième proposition du livre des

<sup>301</sup> Mersenne, *Harmonie universelle*, livre III, prop. XXI, p.213.

<sup>302</sup> *Ibidem*.

<sup>303</sup> *Idem*, p.214.

Sons suivant cette proposition, d'autant que je n'avais pas encore fait des observations assez exactes.

On passe donc de 120 à 69 pieds pour la distance nécessaire à la propagation d'une syllabe. Rappelons qu'il prononçait alors deux syllabes en une demi seconde, donc quatre en une seconde, ce qui fait, selon sa méthode, 96 pas. Sept syllabes se prononcent en une seconde, donc comme la distance à la surface réfléchissante est ici de 485 pieds, cela fait 97 pas. Mais cette distance correspondait à quatre syllabes au livre I, et ici à sept, chaque syllabe correspondant à 13,85 pas, donc 69,22 pieds, ou comme Mersenne l'exprime, 69 et  $\frac{2}{9}$ <sup>304</sup> :

En quatrième lieu, il semble qu'on peut conclure la vitesse de la voix et des autres bruits par le moyen de l'Echo, car puisqu'il répond les sept syllabes, *Benedicam Dominum*, ou telles autres qu'on voudra, et qu'il les renvoie dans une seconde minute, la dernière syllabe *num* fait 485 pieds de Roy en allant, et autant en retournant dans le temps d'une seconde, c'est-à-dire 162 toises ou environ. De manière qu'on peut choisir ce nombre de toises pour la vitesse des Sons réfléchis, laquelle j'ai toujours trouvée égale, soit que l'on use du bruit des trompettes et des arquebuses ou de celui des pierres, et de la voix grave ou aiguë, ce qu'il faut soigneusement remarquer, afin de quitter les différentes opinions, ou plutôt les erreurs, touchant la plus grande vitesse des Sons forts et aigus, que des faibles et des graves, et des autres circonstances, que j'explique ici suivant la grande multitude d'épreuves que j'en ai faites en présence de plusieurs, et que tous peuvent faire pour se désabuser eux-mêmes.

Tout ceci n'est pas forcément clair. Lorsque le *num* est prononcé, il s'est écoulé une seconde, et la première syllabe *Be* est sur le point d'achever l'aller et le retour, puisque son écho est entendu juste après le *num* direct. Donc, en une seconde, le message de sept syllabes fait le double trajet, soit 970 pieds, ou 162 toises. Mersenne mesure donc 162 toises en une seconde. Comme 6 pieds de Roy font une toise, et sachant qu'un pied de Roy fait environ 32,5 de nos centimètres, la vitesse du son mesurée par Mersenne serait de 315 m/s, ce qui est proche de la réalité mesurée depuis le XIX<sup>e</sup> siècle (environ 340 m/s, soit une erreur de 8%).

Mersenne indique les sources sonores qu'il a utilisées pour ces expériences. C'est important car il est probable que la prononciation des sept syllabes qui doivent parcourir 160 mètres et se réfléchir de façon audible, devaient l'être criées, et sans doute assez fort. Mais Mersenne a également utilisé une trompette, des pierres choquées et une arquebuse.

Une fois le résultat annoncé, Mersenne affirme que cette vitesse est constante pour le son direct et pour l'écho. Il s'élève à cette occasion contre l'opinion des Anciens, souvent reprise par les Scolastiques qui s'étendaient rarement sur ce sujet, à propos des vitesses différentes des sons graves ou aigus, et des sons forts ou faibles.

Alors Mersenne, très œcuménique, rassemble autour de cette loi de la vitesse du son constante, l'ensemble des savants dont beaucoup étaient de ses amis<sup>305</sup> :

L'on peut encore déduire beaucoup de conclusions de nos épreuves: par exemple, que le son de l'Echo qui revient est aussi vite que celui qui y va, et que la voix va aussi vite à la fin de sa course qu'au commencement. Ce qui semble merveilleux, soit que le son se fasse par les encyclies ou cercles que l'on s'imagine dans l'air semblables à ceux qui se font dans l'eau, ou par le moyen des atomes et petits corps que l'on s'imagine sortir de la bouche, ou se rencontre dans l'air, ou que l'air étant une fois ébranlé prenne de lui-même un mouvement naturel qui ait toujours une égale vitesse, comme il arrive aux retours des cordes qui sont toujours égaux, et cetera.

Mersenne précise ensuite les conditions de l'expérience. Le temps est mesuré par une horloge à pendule marquant la seconde, c'est-à-dire « dont la corde est de trois pieds et demi ». La phrase de sept syllabes prononcée en une seconde est *Benedicam Dominum*, les lieux d'expériences sont<sup>306</sup> :

la maison de Monsieur d'Ormesson, située dans la vallée de Montmorency, celles de Monsieur de Verderonne, où j'ai mesuré assez exactement la distance nécessaire pour faire répondre tant de syllabes que l'on voudra à toutes sortes de corps, qui sont disposés pour renvoyer et réfléchir le son jusqu'au lieu où il a premièrement été produit.

Cependant, curieusement, après avoir longuement disserté sur l'écho et la vitesse du son, Mersenne ajoute pas moins de neuf corollaires, qui sont des notes apparemment rédigées plus tard, dans lesquelles il lui arrive de préciser ou de modifier certaines affirmations. Or, dans le corollaire VIII, Mersenne relate une autre

<sup>304</sup> Ibidem.

<sup>305</sup> Idem, p.216.

<sup>306</sup> Idem, p.217.

expérience, sur une durée de cinq secondes cette fois, qui bouleverse complètement ce qui venait d'être dit, et notamment les précédentes mesures. Il commence par s'adresser à des contradicteurs<sup>307</sup> :

Puisque les Echos se rencontrent en toutes sortes de lieux où il y a des murailles, il est à propos que ceux qui aiment la Philosophie en fassent eux-mêmes l'expérience, sans se fier aux nôtres que je ne donne pas si réglées que l'on n'y puisse remarquer quelques toises de plus ou de moins, lorsqu'il est question de la distance du lieu où se fait le bruit, jusqu'au lieu qui réfléchit: j'ai dit de plus ou de moins, parce qu'il est certain que bien que la voix fasse 81 toises en allant et autant en revenant, dans le temps d'une seconde minute, il peut néanmoins arriver que l'on remarquera quelques toises de plus ou de moins en de certaines expériences, suivant la rareté, ou la densité, et les autres altérations de l'air.

Il est probable qu'ayant communiqué ses mesures à quelque personnes « qui aiment la philosophie », il y ait eu quelques contestations sur les résultats obtenus. Alors, Mersenne invoque certaines circonstances, comme la densité de l'air. Mersenne affirme toujours l'égalité de vitesse en toutes circonstances et confirme la mesure de 162 toises par seconde. Puis, très curieusement, dans la seconde partie de ce corollaire, Mersenne nous dit<sup>308</sup> :

Si la vitesse des Echos, c'est-à-dire des bruits réfléchis, suivait celle des bruits qui se font tout droit sans réflexion, il faudrait s'éloigner de 115 toises, c'est-à-dire de 34 toises davantage, des murailles qui renvoient le son, parce qu'il fait 230 toises dans une seconde minute, suivant l'expérience que nous avons faite de 1152 toises, qu'il fait dans le temps de cinq secondes.

Et là, la théorie semble s'effondrer à cause de la rigueur du Père Minime et sans doute d'une erreur de mesure, ou à cause d'une configuration particulière des lieux. Mersenne dit qu'il utilise une horloge à pendule dont la corde est de trois pieds et demi, ce qui est la longueur requise pour battre la seconde (du moins sur des oscillations pas trop amples, mais Mersenne l'avait remarqué)<sup>309</sup> :

[...] mais il se peut faire que cette différence de vitesse vienne de ce que le son droit ne va pas si vite aux cent premières toises qu'aux suivantes, et qu'il ne fasse que 162 toises dans la première seconde, et 247 1/2 toises dans chaque autre seconde. Dont nous donnerons la résolution après l'avoir expérimenté tant aux sons droits qu'aux réfléchis, car si l'éloignement de 81 toises fait l'Echo de 7 syllabes prononcées dans une seconde, et qu'il faille augmenter cet éloignement de 123 toises et 3/4 pour entendre l'Echo, ou la répétition de 14 syllabes prononcées en deux secondes, il faudra conclure que le son droit et réfléchi vont d'une même vitesse, et qu'ils ne vont pas si vite au commencement comme ils vont après.

Ces 1152 toises en cinq secondes perturbent décidément Mersenne. Si la théorie de la constance de la vitesse est exacte, alors le son ne fait pas 162 toises par secondes, mais 230 toises. L'erreur est trop importante, alors il imagine que le son parcourt 162 toises la première seconde, puisque cette mesure est validée, et les quatre autres secondes se partageant les 990 toises restantes, soit 247 1/2 toises... Car, à ce moment, Mersenne reste fidèle, par conviction plus que par expérimentation, à l'égalité des vitesses pour le son direct et l'écho.

Mersenne persiste dans sa recherche de la vérité, et dans le livre VIII de l'*Harmonie Universelle*, intitulé *De l'utilité de l'Harmonie* il se soumet<sup>310</sup> :

Il est premièrement certain que le son fort, ou faible, de quelque espèce qu'il soit, par exemple celui de la voix, ou du pistolet et du mousquet, et cetera, soit à vent contraire, ou à gré, va par l'air d'une égale vitesse, comme nous avons expérimenté plusieurs fois fort exactement. En second lieu, qu'il fait 230 toises dans le temps d'une seconde minute, comme nous avons semblablement observé tant sur les grandes montagnes, que dans les allées du parc de Monsieur de Verderonne, et ailleurs. D'où il s'ensuit que le son n'emploiera pas 30 heures à faire le tour de la terre, comme j'avais dit dans le premier Corollaire de la 21 Proposition du 3 livre des Mouvements, à raison que je ne parle là que de la vitesse des sons réfléchis par les échos; mais ayant trouvé que la vitesse des sons droits est beaucoup plus grande, puisqu'ils font 230 toises en même temps que les sons de l'écho n'en font que 162, il faut conclure que le son peut aller dans le temps de 21 heures 5 minutes tout autour de la terre.

Mersenne nous dit ici que les mesures précédentes ne concernaient que les échos, et qu'« il a trouvé que la vitesse des sons droits est beaucoup plus grande », soit 230 au lieu de 162 toises par seconde. Mersenne donne une explication de cette différence<sup>311</sup>.

<sup>307</sup> *Id.*, p.220.

<sup>308</sup> *Ibidem.*

<sup>309</sup> *Ibid.*

<sup>310</sup> Mersenne, *Harmonie universelle*, livre VIII, prop. IX, p.44.

<sup>311</sup> *Idem*, p. 45-46.

Quant au bruit des Echos, qui ne font que 160 toises ou environ dans une seconde minute, il est certain qu'il est plus lent que le son direct. Et parce qu'il est direct en allant du lieu où il se fait jusqu'à la muraille ou au corps qui le réfléchit, et par conséquent, qu'il fait ses 80 toises en moins d'une demie seconde minute, il s'ensuit qu'il fait plus lentement les 80 toises de son retour. Ce que je démontre en cette manière. La voix directe fait 115 toises dans une demie seconde, donc elle en fait 80 en moins de temps, puisque 80 est quasi une fois et demie en 115, car 120 est sesquialtère de 80, et parce que les 5 toises que j'ajoute ne sont pas quasi sensibles dans l'expérience, je m'en sers pour la facilité du calcul, et dis que la voix réfléchie ne va pas si vite que la directe, contre ce que j'avais dit dans la XXIème proposition susdite, qu'il faut modifier suivant ces dernières remarques. Or je trouve qu'en faisant réflexion sur le retour des sons par le moyen des échos, sa vitesse est quasi au son direct, comme 2 à 3 c'est-à-dire en raison sous-sesquialtère. Quoiqu'il soit malaisé d'expliquer pourquoi ce retour est plus lent, car il n'y a pas d'apparence que la muraille retienne la voix quelque espace de temps, puisque l'on expérimente que le retardement se multiplie en même raison que l'on s'éloigne davantage de ladite muraille. Ce qui n'arriverait pas si tout le retardement était causé par elle, d'autant qu'il serait toujours égal, dans ce point de repos ou de réflexion, et qu'il s'en faudrait éloigner de 195 toises pour ouïr la répétition de 14 syllabes, à savoir de 80 pour les 7 premières, comme j'ai dit, à raison du premier retardement, et puis de 115 pour les 7 dernières, qui n'auraient point de nouvelle cause de retardement, si ce n'est que l'on dit que le mur retient le son d'autant plus longtemps qu'il le reçoit de plus loin, ce qui n'est pas vraisemblable, puis qu'ils sont quelquefois beaucoup plus forts et plus vigoureux quand il les reçoit de loin que de près, et néanmoins que l'éloignement de 160 toises lui fait répéter 14 syllabes prononcées en deux secondes, d'où il semble que l'on doit conclure que le retardement vient du son réfléchi, lequel est moins vite que le direct. De sorte que la syllabe qui semble employer une demie seconde entière en allant à la muraille éloignée de 80 toises, et une autre demie seconde à revenir jusqu'à celui qui parle, n'emploie quasi qu'un tiers de seconde pour aller, et les deux tiers à revenir. De sorte que la vitesse du son direct est quasi double de celle du réfléchi. C'est pourquoi ceux qui voudront faire des échos de 14 syllabes doivent éloigner la surface réfléchissante de 160 toises, qui emploieront deux secondes à répondre une syllabe prononcée dans la septième partie d'une seconde. Quoique je ne veuille pas tellement conclure la cause de ce retardement, que je ne sois prêt d'en recevoir une meilleure raison, comme je suis en toutes les autres difficultés dont j'ai parlé.

Ce long passage un peu confus est destiné à montrer l'absence de vraie conviction chez Mersenne à propos de ces différences de vitesse. En effet, en tournant ainsi autour de la question, il n'apporte aucune raison valide pour l'expliquer. Il évoque toutefois un éventuel repos du son sur la surface réfléchissante, évoquant ainsi les théories d'Averroès et même de Von Guericke. Mais Mersenne constate bien que ce repos devrait alors être d'une durée constante, ce qui ne s'observe pas, puisque le rapport de 2/3 de la vitesse du retour, dans ce cas, ne serait pas constant.

On ne saura jamais ce qui a pu conduire Mersenne à faire des mesures aussi différentes, et à conclure ainsi, contre ses propres convictions, que soit la vitesse du son n'est pas la même au début et à la fin de la propagation, soit que le vitesse de l'écho est plus lente que celle du son direct. Il est probable que la mesure sur cinq secondes, qui donnent 1152 toises ait été effectuée avec une arme à feu, et qu'une surface réfléchissante non remarquée devait se situer aux abords de la surface repérée.

En 1644 Mersenne retient cette dernière valeur de 230 toises mesurées à partir de 1152 toises en cinq secondes<sup>312</sup>. Mais, prudemment, il ne parle plus de la vitesse inférieure pour l'écho, et se contente de cette dernière valeur.

Quoi qu'il en soit, sa première mesure, 162 toises ou 315 m/s n'est entaché que d'une erreur de moins de 10%, et c'est ce qui convient d'être retenu. De plus, Mersenne est réellement l'expérimentateur, sans doute le premier, de la vitesse du son, et ceci grâce à l'écho.

### **Gassendi : la vitesse du son indépendante de la hauteur**

Il n'est pas rare de trouver, ici ou là, dans la littérature d'Histoire des Sciences, l'affirmation selon laquelle Gassendi aurait le premier mesuré la vitesse du son. Nous avons vu que c'était Mersenne au moyen de la méthode de l'écho, tandis que Francis Bacon avait donné l'idée de l'arme à feu. Les querelles d'antériorité n'ont pas grande importance, celle-ci nous indique seulement que lorsque François Bernier emploie le 'je', même dans une traduction adaptée de l'œuvre de Gassendi, parfois il parle de lui, Bernier. C'est ainsi que dans l'édition de 1684 Bernier affirme (mais on peut tout à fait croire que c'est Gassendi qui parle, et beaucoup l'on cru)<sup>313</sup> :

<sup>312</sup> Marin Mersenne, *Ballistica phaenomena*, in *Cogitata physico mathematica*, Paris, 1644, Prop. XXXIX, p.138.

<sup>313</sup> François Bernier, *Abrégé de la philosophie de Gassendi*, Anisson, Lyon, 1684, T. III, liv. I, chap. 12, p.196.

Je ne dois pas ici omettre ce que j'ai exactement observé, que le bruit des canons qui se tirent à la place de grève ne s'entend à l'observatoire que sept secondes de temps après qu'on a vu le feu, la distance de ces deux lieux étant de mille deux cent soixante toises ; d'où il s'ensuit que le son fait cent quatre vingt toises de chemin dans une seconde qui est la soixantième partie d'une minute ; ce qui revient assez juste à l'observation qu'en ont fait messieurs de l'Académie de Florence.

Les Académiciens de Florence ont réalisé leur expérience une dizaine d'années après la disparition de Gassendi.

Le même passage, dans l'édition de Bernier de 1674 est rédigé ainsi<sup>314</sup> :

Nous ne devons pas ici laisser passer l'observation du R. Père Mersenne qui, mesurant exactement la vitesse du son, remarqua qu'il parcourait dans une seconde d'heure deux cent trente toises de Paris, et qu'ainsi, dans une minute, ou la soixantième partie d'une heure, il en parcourait plus de quatorze mille.

Ce qui est la traduction d'un passage de Gassendi dans les *Animadversiones*<sup>315</sup> :

Quo loco tacenda non est Mersenni nostri observatio, qui velocitatem soni studiose emensus, deprehendit ipsum uno horae secundo pervadere ducentas triginta parisinas orgyas, seu hexapodas, ac uno proinde minuto horae primo, seu sexagesima horae parte, supra orgyarum quatuordecim millia.

Gassendi se réfère donc bien à son ami Mersenne et fait part de ses mesures. En revanche, et c'est ici tout l'intérêt de ce passage, Gassendi dit également un peu avant que tous les sons se propagent à la même vitesse<sup>316</sup> :

Je remarque seulement une chose tout à fait surprenante à l'égard du mouvement de l'air qui tend du corps sonnant vers l'oreille, c'est que de quelque impétuosité qu'il soit agité par le corps sonnant, il traverse toujours l'espace d'une égale vitesse. Car il est constant par l'expérience que les sons, soit petits soit grands, qui se font dans un même endroit, sont tous portés en un temps égal au lieu d'où ils sont entendus : c'est ce qui se peut aisément observer dans les sons des armes à feu qui sont éloignées, de deux ou trois mille, lors qu'ayant remarqué le moment auquel la flamme qui est produite en même temps que le son paraît aux yeux, l'on compte les battements d'artère, ou les allées et venues d'un pendule jusqu'à ce que le son parvienne à l'oreille ; car l'on remarque que les allées et venues qui sont d'ailleurs d'égale durée, sont égales en nombre, soit que le son se fasse par une grande machine, telle qu'est un canon, ou par une petite, telle qu'est un mousquet.

Il est par ailleurs tout à fait possible que Mersenne et Gassendi, qui se voyaient souvent à Paris, notamment à propos de l'affaire Fludd, aient réalisé des expériences ensemble.

## Le canon de l'Academia del Cimento

La célèbre Academia del Cimento de Florence est fondée quinze ans après la disparition de Galilée pour célébrer sa mémoire en appliquant sa méthode expérimentale et en poursuivant ses recherches. Créée sur l'initiative des frères Medici, Léopold et Ferdinand II, elle accueille une dizaine de savants, dont Viviani, Borelli, Renaldini et son secrétaire Magalotti qui assure la publication des *Saggi di Naturali Esperienze* en 1666, un an avant la dissolution de l'Académie sous la pression de la hiérarchie ecclésiastique soucieuse de réduire au silence les partisans de l'héliocentrisme, mais également de l'atomisme qui se développait beaucoup dans les Académies et les universités italiennes au milieu du XVII<sup>e</sup> siècle.

Il semble que les premières expériences de mesure de la vitesse du son aient été réalisées en 1656 par Viviani et Borelli, à l'instigation de Leopold. Mais les résultats sont erronés, sans doute à cause de la longueur du pendule, que pourtant Viviani avait contribué à perfectionner avec le fils de Galilée, Vincenzo.

En 1666, paraissaient les *Saggi di naturali esperienze*, édités par Lorenzo Magalotti, qui relatent un certain nombre d'expériences effectuées entre 1657 et 1665 par les savants florentins de l'*Academia del Cimento*. Parmi celles-ci on y trouve quelques *Esperienze intorno ai movimenti del suono*, des expériences sur les mouvements du son. La première expérience s'intitule : *Sur le son traversant des espaces égaux dans des temps égaux*. S'inspirant de travaux de Gassendi, elle propose de montrer que le son se propage à la même vitesse, quelles que soient son intensité et sa hauteur. Les Florentins utilisent trois armes à feu de taille différentes, produisant un son plus ou moins sonore et plus ou moins aigu. Ils mesurent à l'aide d'un pendule la

<sup>314</sup> François Bernier, *Abrégé de la philosophie de Gassendi*, Langlois, Paris, 1674, p.379.

<sup>315</sup> Gassendi, *Animadversiones*, t. 1, p. 280. Bernier, *Abrégé*, t III, p. 194-195.

<sup>316</sup> *Ibidem*.

durée entre l'éclair du feu et la perception du son à une distance d'environ trois *miglio*. Les sons parviennent en même temps, ils en concluent donc la constance de la vitesse de propagation.

La seconde expérience, toujours inspirée par Gassendi, constate que le son se propage moins vite en cas de vent contraire, et inversement.

La troisième expérience concerne précisément la mesure de la vitesse du son. Le procédé est basé sur la différence de durée entre la perception de l'éclair et celle du son du canon à une distance rigoureusement mesurée<sup>317</sup> :

In distanza d'un miglio de'nostri puntualmente mifurato, che sono braccia dette volgarmente a terra tremila, si secero far più tiri, cioè sei di spingarda, e sei di mastio, in ciascun de 'quali dalla veduta del lampo all'arrivo del suono si contarono al dondolo dell'orivolo intorno a dieci intere vibrazioni, ciascuna delle quali erano un mezzo minuto secundo. Replicati i medesimi tiri a mezzo il miglio, cioè alla meta della distanza, anche l'orivolo dette precisamente la meta del tempo, contandosi per ogni tiro intorno a cinque delle medesime vibrazioni, onde ci parve di rimaner certificati della suposta equabilita.

[...] il suono pena a correre una distanza nota d'un miglio, trovato danoi esser cinque minuti secondi.

Les savants de Florence ont donc, sur une distance, exactement mesurée, d'un *miglio*, tiré à plusieurs reprises des coups d'arquebuse et ont mesuré le temps entre l'éclair et la perception du son à distance, à l'aide d'un pendule. Ils ont compté dix vibrations complètes d'une demi-seconde chacune. Cette expérience a été réalisée également sur une distance d'un demi *miglio*, et les résultats ont été équivalents.

Le son prend donc cinq secondes pour parcourir la distance d'un *miglio*, soit 3000 *bracci*, donc 600 *bracci* en une seconde. Quand on sait qu'un *braccio* fait 22 pouces rhénans, 600 *bracci* font donc 13 200 pouces, donc 1100 pieds du même pays. Il est alors facile de conclure que la vitesse du son est d'à peu près 183 toises rhénanes, soit 177 toises parisiennes... Ces mesures de la vitesse du son sont à peu près égales à 345 m/seconde, ce qui est très proche de la mesure exacte (344 m/s à 22°C, température fréquente à Florence).

### **Kircher : « Semper diversam soni celeritatem invenimus »**

Kircher est fasciné par la modélisation du son selon les rayons sonores. Fidèle aristotélicien, il est contraint, devant l'accumulation d'expériences, d'accepter le temps pris par le son pour se propager, et donc la notion de vitesse. Il ne peut cependant pas admettre que cette vitesse soit constante. Lorsque Kircher rédige la *Phonurgia*, qui paraît en 1673, ses confrères Jésuites ont effectué un revirement important dans l'appréhension du mouvement sonore. Quittant l'aristotélisme et le modèle du 'rayon sonore', ils sont les principaux animateurs du courant ondulationniste, avec Grimaldi et surtout Pardies et son ami Ango. Kircher apparaît alors comme un défenseur de l'archaïsme scientifique au sein de la communauté scientifique jésuite. On retrouve d'ailleurs ce même mouvement de pensée en ce qui concerne l'héliocentrisme et l'atomisme, de plus en plus admis, discrètement bien entendu, par les savants jésuites à la fin du XVII<sup>e</sup> siècle. Reprenant l'image d'Aristote dans le *Traité de l'âme*, Kircher affirme que, comme une balle lancée, le son n'a pas la même vitesse selon qu'il est fort ou faible. Est-il conscient que cette analogie l'emmène vers la zone dangereuse de l'atomisme ? En effet, cette comparaison mécanique laisse supposer que le son a une existence matérielle et surtout qu'il est un mouvement de matière. Mais en 1673 Kircher est sur la défensive, son argumentation se fait parfois incohérente.

Kircher n'est pas un expérimentateur, et lorsqu'il lui arrive d'observer, avec toute la rigueur scientifique en principe requise, c'est pour utiliser la réalité à fin d'argumentation. On est très loin d'un Mersenne qui acceptait la contre expérience sans aucun état d'âme, si on ose dire. Dans cette affaire de vitesse du son, Kircher emprunte et ampute des citations de Mersenne à propos de constatations sur les différences de perception du son le jour et la nuit. On sait que Mersenne, qui lui, expérimente beaucoup, relate un certain nombre de faits qui peuvent parfois apparaître contradictoires, parce que la manipulation expérimentale nécessite une attention de toutes les situations, en particulier sur la méthode et sur les procédures. A l'époque de Mersenne, on en est aux balbutiements de la méthode expérimentale, et il est fréquent que certaines mesures soient entachées d'erreurs de manipulation. Mersenne n'hésite d'ailleurs pas à revenir sur des textes rédigés antérieurement et à corriger certaines de ses affirmations après avoir renouvelé l'expérience. Lorsque Kircher déclare : «semper diversam soni celeritatem invenimus.» [Nous trouvons la vitesse du son toujours différente], on sait bien qu'il n'a pas pu pratiquer d'expérience. De nombreux savants avaient reproduit un grand nombre de fois l'expérience de la mesure de la vitesse du son, et avaient conclu que cette vitesse était constante, du début à la fin de son mouvement, et quelles que soient les conditions atmosphériques, d'intensité ou de hauteur du son, ou encore du type de source sonore. Que ce soit Mersenne, à plusieurs reprises, Gassendi, les savants Florentins,

<sup>317</sup> Lorenzo Magalotti, *Saggi di naturali esperienze*, Academia del cimento, Florence, 1666, p.244.

les expérimentateurs de la Royal Society, les cartésiens comme Rohault, et même les Jésuites comme Grimaldi, tous les savants crédibles de cette époque du milieu du XVII<sup>e</sup> siècle affirmaient cette constance de la vitesse du son. On peut légitimement se poser la question de la finalité de ce genre de position intenable. Peut-être que Kircher cherchait à évaluer l'influence du dogme, scientifique en l'occurrence, sur la population instruite qu'il ne se décourageait pas de convaincre.

### Les expériences de mesure à la *Royal Society*

Les '*natural philosophers*' anglais ont entrepris plusieurs recherches sur le son au sein de la Royal Society, mais toutes n'ont pas donné lieu à publication. Bien avant déjà, quelques savants avaient étudié la nature physique du son, dans le sillage de Francis Bacon. C'est notamment le cas de Christopher Wren, le père de Sir Christopher, dont on a retrouvé des notes marginales dans son propre exemplaire de *Sylva sylvarum*, qui font état d'expériences qu'il aurait faites selon la méthode proposée par Francis Bacon pour mesurer la vitesse du son<sup>318</sup>.

Selon Penelope Gouk, qui a étudié le travail de recherche sur le son autour de la Royal Society lors de sa création, le sujet de la mesure de la vitesse du son était une opportunité idéale pour appliquer les nouvelles méthodes expérimentales. Et en effet, plusieurs savants anglais, dans les années 1661 à 1668 s'attellent à ces mesures, en utilisant surtout la méthode des armes à feu. D'autres travaillent sur l'écho, et on commence également à étudier plus en profondeur les vibrations des cordes. En dépit de cette activité, peu de publications sont entreprises par ces savants, et peu de comptes rendus d'expériences ont été conservés. Aucune mesure de la vitesse du son n'a été effectuée réellement en séance, probablement parce que ces expériences étaient effectuées à l'extérieur. Cependant on discutait des résultats et des influences susceptibles d'expliquer les différences de mesure. C'est ainsi qu'on analysait les mesures en notant scrupuleusement les conditions atmosphériques, en particulier le vent, la pression barométrique et la température. Boyle a relaté de telles expériences dans *Some considerations touching the usefulness of natural philosophy* (1671). Penelope Gouk a retrouvé les traces de travaux effectués en 1661 par Charleton, Goddard et Croune, sur l'écho. A la même époque, Oldenburg mandate Robert Southwell, alors en Italie, de recenser tous les phénomènes d'écho et tous les effets particuliers du son qu'il pourrait être amené à rencontrer au cours de ses voyages. Les savants anglais étaient fascinés par ces effets dont ils avaient lu les récits dans les ouvrages de Francis Bacon, de Mersenne, de Biancani et de Kircher qui avaient tous beaucoup de succès outre-Manche. Il n'est pas anodin que Sir Christopher Wren ait décidé, à cette époque de construire la fameuse 'galerie des chuchotements' (whispering gallery) de la Cathédrale St Paul de Londres. En 1662, pas moins de trois mémoires sont présentés à la Royal Society sur des effets sonores. L'un, de Powle sur les effets spéciaux produits par les réflexions de sons, le second de Moray sur l'observation d'un écho près d'un lac en Ecosse, et le troisième de Charleton sur des appareils phonocamptiques, selon le vocabulaire emprunté à Kircher. Dans cet essai, Charleton revient sur la question de la différence de vitesse entre le son direct et le son réfléchi, tel que l'avait décrit Mersenne. Hooke également va participer à ces recherches sur la mesure de la vitesse du son. En 1668, on lit en séance de la Royal Society le rapport des expériences sur la vitesse du son effectuées à Florence en 1660 et publié en 1666 dans les *Saggi di naturali esperienze*, édités par Lorenzo Magalotti. On découvre alors qu'un professeur de géométrie anglais, Lawrence Rooke décédé depuis, avait effectué ces mesures à la même époque que les savants florentins, et semble-t-il avec les mêmes résultats. La communication, entre savants de différents pays à cette époque, était singulièrement compliquée par les différentes unités de mesure en usage dont peu de personnes connaissaient les équivalences.

### Huygens chez les Perrault à Viry

Huygens n'a pas beaucoup écrit sur la physique des sons. On a quelques notes manuscrites sur le sujet, mais rien de structuré. Parmi celles-ci, la relation d'une expérience de mesure de la vitesse du son, dans la propriété de ses amis Perrault<sup>319</sup> :

La maison qui faisait l'écho était distante du lieu où l'on criait de 1042 pieds de Rynlande qui font 1005 pieds de Paris, tellement que le son en allant et venant faisait 2010 pieds. Et le temps qu'il employait à cela était de 2 vibrations d'un pendule de 2 pieds 7 1/2 pouces ce qui fait 1"52". Donc puisque dans ce temps de 1"52" le son fait 2010 pieds, il fera en 1", 1076 pieds ou à peu près 180 toises.

La mesure de Huygens est approximativement de 349 m/s (ce qui est la vitesse du son à 30°C...).

<sup>318</sup> R.L. Colie, 'Dean Wren's Marginalia and Early Science at Oxford', in *Bodleian Library Record*, 6 (1960), pp.541-551. Cité par Penelope Gouk, 'Acoustics in the Early Royal Society' in *Notes and Records of the Royal Society of London*, 1982, p.159. Les informations données dans ce paragraphe sont issues de l'article de Penelope Gouk.

<sup>319</sup> Christiaan Huygens, *Oeuvres complètes*, Ed. Nation. Hollandaise, Tome XIX, p 372.



## Les mesures académiques parisiennes : Picard, Cassini, Roemer

Le 26 juin 1677, on trouve, dans les Procès Verbaux de l'Académie Royale des Sciences, la trace d'une expérience historique de mesure de vitesse du son :

*M<sup>r</sup> Picard a fait son rapport de  
l'observation qu'il a faite avec M<sup>rs</sup>  
Cassini, et Roemer le 23.<sup>e</sup> de Juin, tou-  
chant le temps qui est entre la lumière,  
et le bruit ayant mesuré exactement  
l'espace qui est entre l'observatoire, et  
la grève qui a esté trouvée de 1280. toises*

*et le son des Canons et des fusées s'entendoit  
7 secondes de temps après qu'on avoit veu le  
feu, M<sup>r</sup> Roemer ayant esté en même  
temps à Châtillon, dont la distance est  
environ le triple de celle qui est de l'obser-  
vatoire à la grève il entendoit le son 21.  
Secondes après, et il jugea du bruit des fusées  
quant elles se dissipoient en étoiles*

[Monsieur Picard a fait son rapport de l'observation qu'il a faite avec Messieurs Cassini et Roemer le 23 de Juin, touchant le temps qui est entre la lumière et le bruit, ayant mesuré exactement l'espace qui est entre l'observatoire et la grève qui a été trouvé de 1280 toises [le '2' est curieusement écrit]. Et le son des canons et des fusées s'entendait 7 secondes de temps après qu'on a vu le feu. Monsieur Roemer ayant été en même temps à Châtillon dont la distance est environ le triple de celle qui est de l'observatoire à la grève il entendait le son 21 secondes après, et il jugea du bruit des fusées quand elles se dissipaient en étoiles.]

On note que la mesure à effectuer est celle de la différence entre la vitesse du son et celle de la lumière, et non la détermination absolue de la vitesse du son. Cette nuance s'apprécie au regard du travail de Roemer sur la vitesse de la lumière. Bien entendu, cette précision n'a aucune incidence importante sur le résultat. Celui-ci est de  $182 \frac{5}{6}$  toises, soit 1097 pieds de Paris, ou encore 356 m/s, ce qui est une mesure assez incorrecte. Cette mesure est reprise par Derham en mesure londonienne, soit 1072 pied anglais.

## Les observations sur le son de Joshua Walker

L'article de Joshua Walker, paru dans les Philosophical Transactions de 1698<sup>320</sup> est un exemple de rapport d'expériences. En cinq pages écrites en phrases courtes, l'auteur expose les conditions de l'expérience, les mesures effectuées, avec le rappel de résultats de Mersenne de Boyle et des Florentins. Il précise, pour chacune de ses propres mesures les conditions, de lieu, de vent, d'horaire, etc. Walker utilise la méthode de l'écho, en claquant deux planchettes de bois. Les lieux d'observations sont des cours ou des cloîtres à St John's Grove, St John's Cloister et le New College Cloister, dans lequel Walker a pu remarquer un écho multiple. La durée est précisément mesurée grâce à un pendule confectionné par lui-même en tenant compte des réserves énoncées par Mersenne et Galilée. Walker se place à proximité d'un grand mur qui réfléchit le son, et cherche la place idéale pour que l'écho revienne en une demi-seconde. Ensuite il procède à la mesure de distance. La

<sup>320</sup> Joshua Walker, 'Some experiments and observations concerning sounds', in *Philosophical Transactions*, 247, dec. 1698, p.433-438.

moyenne des résultats se situe aux environs de 1300 pieds anglais, soit 1220 pieds du Roy, ou encore 396 m/s. Ce résultat n'est pas très bon, il est entaché d'une erreur d'environ 15% au-delà de la vitesse correcte. Il est probable que, la méthode de l'écho n'étant déjà pas très sûre, soit il y avait des surfaces réfléchissantes non repérées, soit le pendule était inexact.

En revanche, Walker entreprend une discussion intéressante, en opposant les thèses de Mersenne, de Gassendi et des Florentins à celles de Robert Plot et de Kircher à propos de la constance de la vitesse. En effet, Kircher, qui est très lu en Angleterre, affirme que le son se propage à différentes vitesses, selon qu'il est fort ou faible, ou qu'il se réfléchit ou selon même le type de son, voix ou bruit. Il est étonnant que cinquante ans après la parution de la *Musurgia*, on estime encore nécessaire de réfuter des thèses qui ont été maintes fois contestées et écartées par la communauté scientifique.

## L'article de Derham, une synthèse des travaux du XVII<sup>ème</sup> siècle

Au début de 1708, le Révérend William Derham publie un article d'une trentaine de pages dans les *Philosophical Transactions* intitulé *Experimenta et observationes de soni motu*. Il s'agit d'une synthèse des travaux effectués en Angleterre, autour de la Royal Society, mais également en Italie et en France, sur la mesure de la vitesse du son et de ses variations. L'article commence par un petit tableau qui récapitule les mesures depuis Mersenne. Derham a converti les valeurs en pieds anglais et les valeurs se répartissent entre 1174 (Flamstead) et 1442 (Mersenne) pieds anglais. Une valeur est nettement hors du lot, elle n'est pas le résultat d'une mesure mais d'un calcul, c'est 968 pieds (Newton), on verra pourquoi. Ensuite Derham détaille les conditions de mesure et tente de discerner ce qui peut provenir de causes exogènes et ce qui provient de maladroitness de manipulations, encore que cette dernière raison, qui pouvait être invoquée du temps de Mersenne (dont Derham retient la valeur de 230 toises/s), n'avait plus de légitimité à la fin du siècle.

Dans cet article, Derham, comme Joshua Walker, s'en prend vigoureusement à Kircher à propos de ses supposées expériences sur les vitesses variables du son. Et Derham déclare, en reprenant les termes de Kircher, que :

[...] sive coelum fit sudum et serenum, sive nubilosum et turbidum, sive nix decidit, sive nebula [...], sive tonat aut fulgurat, sive aestus vel frigus adurit, sive dies vel nox fit, aestus vel hyemi, sive mercurius in barometro ascendit vel descendit: verbo dicam, in omnibus quibuscunque atmosphaerae mutationibus (ventis tantum exceptis), motus soni nec velocior nec tardior est; tantum magis vel minus clarus est [...] medii variatione. Quod forsan Kircherum sagacem deceptit.

[[...] que le ciel soit sans pluie et sans nuage ou nuageux et orageux, ou que la neige tombe, que ce soit nuageux, qu'il tonne et qu'il y ait des éclairs, qu'il fasse chaud ou froid, que ce soit le jour ou la nuit, l'été ou l'hiver, que le mercure dans le baromètre monte ou descende: je dis donc, dans tous les changements atmosphériques (sauf pour le vent), le mouvement du son n'est ni plus rapide, ni plus lent; que le son soit fort ou faible [...]. Peut-être la sagacité de Kircher a été trompée...]

Derham ne parle pas à la légère, il a réellement fait ces expériences, il fait ensuite la liste de chacune d'elle et précise les conditions dans lesquelles elles ont été faites, et notamment le vent dont il dit qu'il a une influence sur la vitesse du son. Il relate également des expériences faites en Italie vers 1705, auxquelles Newton a participé. Le résultat moyen de Derham, après ces nombreuses mesures, est de 1142 pieds anglais, soit 346 m/s.

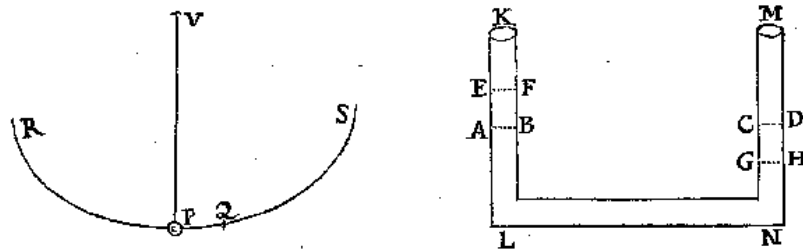
Dies Mensis & Anni.	Hora Diei	Numerus Virium	Ventorum Plaga.	Nubium Plaga.	Altitudo.
1704.					
Febr. 13	6 h. ad med. noc.	120	NE b E	NE b E	29 99
11	11 1/2 mane	119	E 2	E	30 22
1705.					
Mar. 30	10 mane	113	S W 7	S W	29 30
Ap. 2	8 1/2 p. M.	114	S b W 1		
3					
3	10 mane	116	S 4	Inferior S Sup. W b N	29 80
5	1 p. M.	111	SW b W 7	S W b W	29 70
13	8 1/2 mane	120	N b E 3		29 26
24	5 p. M.	116	SW b W 0	N W	29 59
Sept. 11	6 1/2 p. M.	115	W 2	W b N	Saker.
	7 p. M.	115	W b N 2		Mortar.
29	10 1/2 mane	112	SS W 6	SS W	29 38
Octob. 6	10 mane	117	ESE 1 & 2	SE	29 34
Nov. 30	m. ridg.	115	SS W 4	SS W	29 10
Febr. 15	11 mane	116	S b W 1	SW	29 60
1706.					
Nov. 29	11 1/2 mane meridie	116 118	SW 0 SW 1 S 1	SW b W	30 06
Febr. 7	meridie	113	W b W 1	W	29 83

Exemple de tableau récapitulatif des mesures effectuées par Derham pour déterminer la vitesse du son dans l'air. (*Philosophical Transactions*, février 1708)

## Newton et le son

Newton, à la fin de la section VII du livre II des *Principia*, consacrée aux mouvements des fluides, entreprend de déterminer la vitesse de propagation des pulsions sonores dans l'air, ce qu'on nomme couramment la vitesse du son. On sait qu'elle a été mesurée expérimentalement par les savants de l'Académie de Florence, en mesurant le temps entre l'éclair et le son d'un canon.

Newton procède tout à fait différemment. Tout d'abord, Newton étudie le mouvement d'un fluide dans un tube coudé en U :



Newton déclare :

*Si de l'eau descend & monte alternativement dans les branches K.L., M.N. d'un canal ; & qu'on ait un pendule dont la longueur entre le point de suspension & le centre d'oscillation soit égale à la moitié de la longueur de la colonne d'eau qui est dans le canal : je dis que l'eau montera & descendra dans ce canal dans les mêmes temps dans lesquels ce pendule oscillera.*

Partant des conclusions de Mariotte sur la compressibilité des gaz, Newton aborde le son comme une succession de compressions et de détentes des parties qui composent l'air. Cette succession constitue un mouvement vibratoire qu'il entreprend d'étudier.

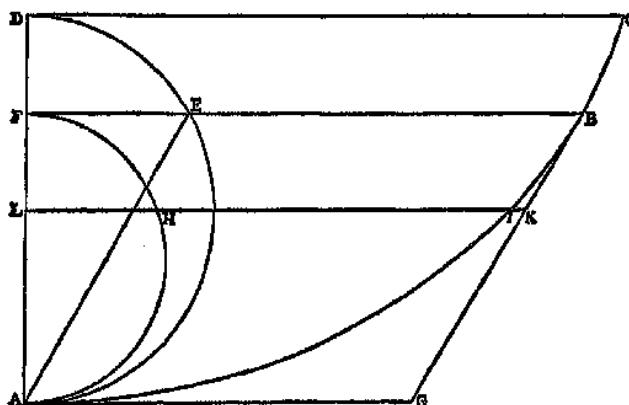
Newton transpose le mouvement alternatif de l'eau dans le dispositif en U à l'air en mouvement lors de la propagation d'un son. Il peut le faire, puisque l'air dans ce cas est un fluide qui ne subit aucune contrainte et se déplace librement.

Ces mouvements sont analogues aux oscillations d'un pendule dont la longueur serait la hauteur de la colonne d'air<sup>321</sup> :

Les poids spécifiques de l'eau de pluie et du vif argent sont l'un à l'autre comme 1 à 13 2/3 environ, et lorsque le mercure est à la hauteur de 30 pouces anglais dans le baromètre, les poids spécifiques de l'air et de l'eau de pluie sont alors l'un à l'autre comme 1 à 870 environ : donc les poids spécifiques de l'air et du vif argent sont entre eux comme 1 à 11 890, donc la hauteur du vif argent étant de 30 pouces dans le baromètre, la hauteur de l'air uniforme dont le poids peut comprimer notre air d'ici-bas, sera de 356 700 pouces, ou de 29 725 pieds anglais.

Newton doit calculer la longueur A du pendule, qui déterminera à la fois la durée de son oscillation, et par ailleurs la distance parcourue par une onde, et donc on pourra calculer sa vitesse de propagation.

Ici il est nécessaire de faire appel à la théorie du pendule telle qu'elle est développée par Huygens dans l'*Horologium oscillatorium*. En effet, la courbe tautochrone, celle qui fait une oscillation de même durée, quelle que soit la hauteur de départ, est la cycloïde. La masse du pendule, dans son parcours a une vitesse variable, accélérée lorsqu'elle descend. Le temps de descente est égal au temps parcouru par un mobile virtuel le long de la demi-circonférence du cercle générateur de la cycloïde :



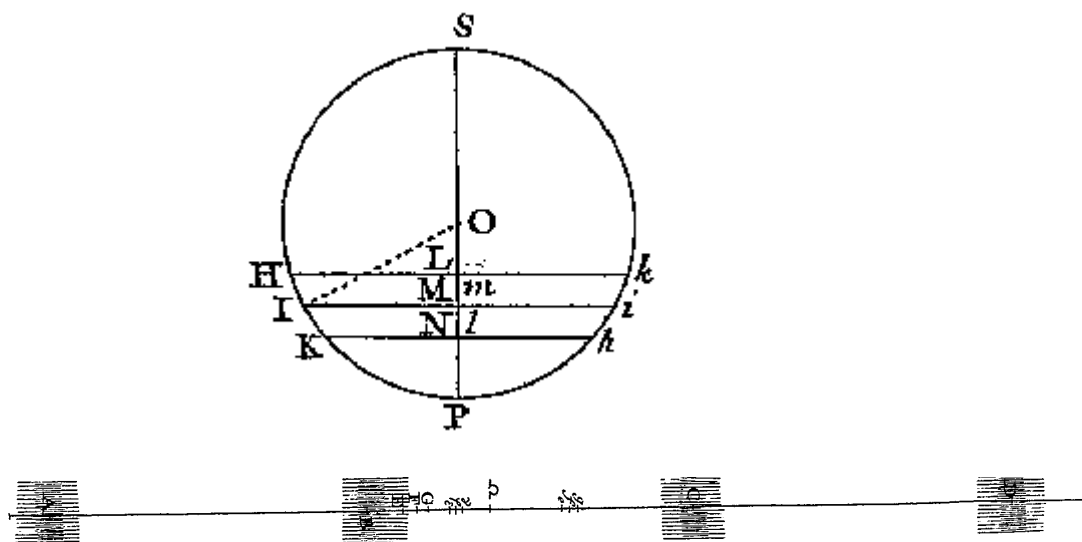
*Dans une cycloïde à axe vertical et dont le sommet se trouve en bas, les temps de descente dans lesquels un mobile, partant du repos d'un point quelconque de la courbe, atteint le point le plus bas, sont égaux entre eux, et ont au temps de la chute verticale le long de l'axe entier de la cycloïde une raison égale à celle de la demi-circonférence d'un cercle à son diamètre.*

La 'raison égale à celle de la demi-circonférence d'un cercle à son diamètre, c'est  $\pi/2$ . D'où, si la descente est proportionnelle à  $\pi/2$ , un battement du pendule l'est à  $\pi$ , et bien entendu une oscillation complète l'est à  $2\pi$ .

C'est ici que Newton fait preuve d'une grande abstraction. Il représente le mouvement à vitesse variable de l'oscillation complète du pendule par un mobile virtuel en déplacement à vitesse constante sur la circonférence d'un cercle dont le diamètre est égal à la longueur du pendule.

Reprenant la représentation circulaire de l'oscillation du pendule analogue aux mouvements vibratoires de l'air lors de la propagation d'un son, Newton peut alors décrire le mouvement de cette façon :

<sup>321</sup> Newton, *Principia*, trad. Mme Du Châtelet, Prop. L, scholie, p 410.



Grâce à cette représentation, Newton parvient à convertir un mouvement vibratoire longitudinal de vitesse variable, en mouvement circulaire à vitesse constante. C'est de cette façon que Newton va pouvoir déterminer par calcul la vitesse du son :

*Cor. 1.* La vitesse des pulsions est celle que les graves acquièrent en tombant d'un mouvement également accéléré, & en parcourant dans leur chute la moitié de la hauteur  $A$ . Car dans le temps de cette chute la pulsion parcourra avec la vitesse qu'un corps aurait acquise en tombant un espace qui fera égal à toute la hauteur  $A$  ; donc dans le temps d'une oscillation entière composée de l'allée & du retour, elle parcourra un espace égal à la circonférence du cercle dont le rayon est  $A$  : donc le temps de la chute est au temps de l'oscillation comme le rayon du cercle est à sa circonférence.

*Cor. 2.* Ainsi, cette hauteur  $A$  étant directement comme la force élastique du fluide, & inversement comme la densité ; la vitesse des pulsions sera en raison composée de la raison souf-doublée de la densité inversement, & de la raison souf-doublée de la force élastique directement.

### La détermination de la vitesse du son par le calcul, selon Newton

Pour calculer la vitesse de propagation des ondes sonores, il faut définir une distance parcourue par un mobile à vitesse constante pendant le même temps que celui d'un grave en chute uniformément accélérée. Cette distance est donnée par la formule de Huygens, en donnant comme durée, celle de l'oscillation d'un pendule, et comme distance de chute le diamètre du cercle engendrant la cycloïde décrite par le pendule, égal à la longueur du pendule.

Pour Newton, si on considère un aller et retour du pendule, et la distance  $A$ , verticale de chute, donc diamètre du cercle engendrant la cycloïde parcourue par le pendule, on a :

Dans la durée d'un aller et retour du pendule, la distance à vitesse constante est égale à  $2\pi A$ , (Pour Huygens, on a une raison de la demi circonférence à son diamètre, soit  $\pi/2$  pour une descente de l'arc de cycloïde, soit un demi aller simple du pendule, pour Newton, c'est donc 4 fois plus pour un aller et retour du pendule).

Si A représente la force correspondant à l'air pesant sur les parties d'air en mouvement, convertie en rapport avec la hauteur de mercure pour la même force du poids de l'air, on a :

Le rapport des poids spécifiques de l'eau au vif argent (mercure) = 13 2/3.

Le rapport des poids spécifiques de l'air à l'eau de pluie = 870.

Donc,

Le rapport des poids spécifiques de l'air au vif argent (mercure) = 11 890.

Pour 30 pouces de mercure, on a donc l'équivalent d'air égal à :

$A = 30 \times 11890 = 356\,700$  pouces d'air uniforme = 29 725 pieds.

D'où, la distance parcourue à vitesse constante pendant un temps correspondant à une chute accélérée sur cette même distance sera donc  $2\pi A$ , soit, si l'on prend  $\pi = 22/7$  :

$2\pi A = 2 \times 22 \times 29725 / 7 = 186\,768$  pieds.

Calculons le temps t égal au temps d'oscillation complète du pendule de longueur A :

La longueur d'un pendule effectuant un aller retour en 2 secondes est de 39,2 pouces. Les durées d'oscillation sont proportionnelles à la racine carrée de la longueur du pendule. La longueur du pendule correspondant à la hauteur A est de 356 700 pouces<sup>322</sup>.

$t / \sqrt{L} = 2 / \sqrt{39,2} = t / \sqrt{356\,700}$ , soit  $t = 190,81$  secondes.

La distance parcourue à vitesse constante est de 186 768 pieds, en un temps de 190,81 secondes. Donc en une seconde, cette distance sera de 979 pieds anglais (env. 303 m/s).

C'est la vitesse de propagation des ondes sonores dans une atmosphère homogène à pression atmosphérique moyenne.

Newton résume cette démonstration en quelques lignes qui méritaient bien un développement:

La circonférence du cercle dont le rayon est de 29 725 pieds en a 186 768 ; et comme on sait qu'un pendule de 39 1/5 pouces fait une oscillation composée de son allée et de son retour en deux secondes, un pendule qui aurait 29 725 pieds ou 356 700 pouces devrait faire une semblable oscillation en 190 1/4 secondes ; donc pendant ce temps, le son parcourera 186 768 pieds, et 979 pieds en une seconde

Newton obtient 979 pieds anglais, soit 915 pieds parisiens, par seconde. Ce résultat contredit les nombreuses expériences pratiquées auparavant qui donnaient environ 1080 pieds parisiens, soit une erreur d'environ 20 %.

Newton se rend bien compte de la distorsion de son calcul avec les résultats de l'expérience. Alors il invoque les particules contenues dans l'air, les sels, 'presque deux fois plus denses que l'eau' ; puis les 'vapeurs cachées dans l'air' qui ne propageraient pas le son ; et enfin la température, ce qui est exact.

A la suite de Newton, le jeune Leonhard Euler écrit, à l'âge de 20 ans, une *Dissertatio de sono*, son premier travail universitaire, dans laquelle il reprend la théorie développée par Newton, mais de façon plus compréhensible, et en y introduisant les notions issues de la musique comme l'intensité et la hauteur liée à la fréquence, et en évoquant les consonances, sujet qu'il approfondira quelques années plus tard.

### Le jeune Euler et la vitesse du son : une mystification ?

La *Dissertatio physica de sono* a été écrite par Euler en 1726, pour soutenir sa candidature à un poste d'enseignement en physique à l'Université de Bâle. La soutenance s'est tenue le 18 février 1727, Euler n'avait pas encore 20 ans. La candidature fut refusée, et Euler, a peu après été appelé à St Petersburg.

La dissertation comprend deux parties, la première sur la propagation et la seconde sur la production des sons. Euler aborde la vitesse du son dans la première partie et entreprend de la déterminer par calcul, dans le

<sup>322</sup> On pourrait calculer t en tenant compte de l'accélération de la pesanteur, mais c'est équivalent à utiliser la proportionnalité avec le pendule qui fait 2 secondes, c'est ce que fait Newton.

but de faire coïncider les résultats des observations avec la démarche mathématique, et dépasser ainsi l'erreur de 20 % produite par la méthode de Newton.

Voici la démarche du jeune Euler :

§ 9 Sit (ut rem generaliter complectar) gravitas mercurii specifica ad æris gravitatem ut  $n$  ad 1, altitudo mercurii in barometro =  $k$ , longitudino penduli =  $f$ , secundum cuius oscillationes tempus, quo sonus per intervallum  $a$  transmittitur, dimetiri lubet. Hisce factis denominationibus, propagationis soni per

ego invenio, quod tempus unius oscillationis penduli,  $f$ , se habeat ad tempus

$$\text{intervallum } a \text{ ut 1 ad } \frac{a}{4 \times \sqrt{n \times k \times f}}$$

§ 10. Si  $a$  et  $k$  determinentur in scrupulis, loco  $f$  autem ponatur 3166, indigabit hic valor (1) :

$$\frac{a}{4 \times \sqrt{3166 \times n \times k}}$$

quot minutis secundis sonus per intervallum  $a$  propagari debeat. Est enim longitudo penduli singulis minutis secundis oscillantis scrup. 3166. Cum itaque distantia  $a$  absolvatur tempore (1), erit distantia, ad quam sonus uno minuto secundo diffunditur scrup.

$$4 \times \sqrt{3166 \times n \times k}$$

Euler affirme :

si

$n$  = rapport des poids spécifiques de l'air et du mercure

$k$  = hauteur de mercure à pression atmosphérique moyenne

$f$  = longueur du pendule faisant une oscillation aller retour en 2 seconde

$v$  = vitesse de propagation des ondes sonores

on a

$$v = 4 \times \sqrt{n \times k \times f}$$

soit :

$$v = 4 \times \sqrt{12\,000 \times 2460 \times 3166} = 1222,800 \text{ pieds rhénans (env. 382 m/s)}$$

les formules de Newton et d'Euler sont identiques, au facteur près, 22/7 pour Newton, ce qui est exact, et 4 pour Euler mais on ne sait pas d'où vient ce facteur 4.

La tentative d'Euler est un échec, car il n'a pas pu démontrer l'origine de ce facteur 4 au lieu de 22/7 qui, pensait-il peut-être, allait abuser le jury... Rappelons toutefois que le futur grand mathématicien n'avait pas 20 ans.

Cependant il reprend cette formulation, toujours avec ce facteur 4, dans la *Dissertatio de igne*, publiée en 1738<sup>323</sup> :

Interim tamen, antequam huic dissertationi finem imponam, non abs re fore arbitror, si formulam subjungam, ex qua, quanta celeritate vibrationes per quodvis medium elasticum propagentur, intelligere licebit. Eo minus autem hanc meam formulam communicare dubito, cum Neutoni formula non solum experientiae de celeritate soni non quadret, sed etiam infirmis nitatur fundamentis. Mea autem formula est sequens : Sit  $K$  altitudo Mercurii, cujus pondus vi elasticæ mediæ sit æquale, quo abibit in altitudinem barometricam, si aër pro medio illo accipiatur. Deinde exprimat  $1 : n$  rationem gravitatum specificarum, seu densitatum Mercurii & mediæ ; prætereaque

<sup>323</sup> L. Euler, *Dissertatio de igne in qua ejus natura & proprietates explicantur*, St Petersburg, 1737, prop. 28-29.

designet  $f$  longitudinem Penduli simplicis singulis minutis secundis oscillantis. His positis, inveni vibrationes in tali medio uno minuto secundo propagari per spatium =

[Pour l'instant cependant, avant de mettre un terme à cette dissertation, je pense qu'il ne sera pas hors de propos d'ajouter une formule à partir de laquelle on pourra comprendre à quelle vitesse les vibrations sont propagées à travers un quelconque milieu élastique. Or j'hésite d'autant moins à faire part de ma formule, que la formule de Newton non seulement ne s'accorde pas à l'expérience au sujet de la vitesse du son, mais encore s'appuie sur des bases faibles. Or ma formule est la suivante : soit  $K$  la hauteur du mercure, dont le poids est égal à la force élastique du milieu, qui se changera en hauteur du baromètre, si l'air est pris pour ce milieu. Ensuite  $1/n$  exprime le rapport des poids spécifiques, c'est-à-dire des densités du mercure et du milieu ; et en outre  $f$  désigne la longueur du pendule simple oscillant à chaque seconde. Ceci posé, j'ai trouvé que les vibrations dans un tel milieu se propagent à travers l'espace en une seconde selon la formule :

$$4 \sqrt{\frac{fK}{n}}$$

Ce qui revient à présenter la précédente formule d'une façon un peu différente (en effet,  $n$  est devenu  $1/n$ , et  $k$  est devenu  $K$ ...)

Quoi qu'il en soit, ces attermoissements révèlent une certaine perplexité des savants à propos de la vitesse du son.

Cette distorsion entre les mesures effectuées par les expérimentateurs et les calculs des mathématiciens perdure et ne sera expliquée qu'au début du XIX<sup>ème</sup> siècle par Laplace. En effet Newton se fonde sur la loi de compressibilité des gaz parfaits à température constante, alors que la transformation est dite adiabatique, c'est-à-dire sans échange thermique avec le milieu. On applique donc un coefficient correcteur ( $\sqrt{\gamma} = 1,2$ ), déterminé expérimentalement par Laplace et sensiblement égal à l'erreur entre le calcul de Newton et la vitesse mesurée. Tout au long du XVIII<sup>ème</sup> siècle cette distorsion plonge les scientifiques dans une grande perplexité, tiraillés entre le respect envers la rigueur de la démonstration du savant anglais et les mesures de plus en plus précises effectuées dans plusieurs pays.

### La mission de l'Académie des Sciences : Cassini 1738

Dans les années 1730, on dispose de trois sources validées en ce qui concerne la mesure de la vitesse du son : les Savants Florentins, les mesures de l'Académie des Sciences de 1677, et celles de Derham en 1708. Ces mesures sont disparates, et on évalue mal l'influence de l'environnement. L'Académie Royale des Sciences mandate des savants, autour de Cassini de Thury<sup>324</sup>, afin de mesurer le plus précisément possible la vitesse du son. Cassini relate toutes les expériences, menée en mars 1738 en région parisienne, dans un mémoire publié le mois suivant<sup>325</sup>. On choisit quatre lieux élevés de la Région Parisienne, dont Montmartre, l'Observatoire et Montlhéry, afin de voir le plus loin possible la source lumineuse qui produit le son, c'est-à-dire un canon ou une charge plus faible, que les autorités mettent à disposition des scientifiques. Les observations sont effectuées par tous les temps, sauf par temps très chaud, et à toute heure. En effet, les conditions environnementales sont jugées très importantes et susceptibles d'expliquer les grandes différences de mesure lors des observations passées. Après un très grand nombre de mesures, la valeur de 173 toises semble être la plus recensée, soit environ 337 m/s, ce qui est exactement la vitesse à 10°C, or Cassini dit que la température est « à 6° au-dessus de la congélation de l'eau », ce qui, devrait donner 335 m/s, ou 171,8 toises par seconde.

Le jeune Cassini, il avait 23 ans à ce moment, fait preuve d'une grande rigueur. Il consigne les distances mesurées avec la méthode trigonométrique, les pressions barométriques, le temps qu'il fait, l'heure de la mesure. Les premières expériences se font de nuit pour mieux apercevoir la lumière de la mise à feu, mais plusieurs ont eu lieu de jour. On fait même des essais avec le canon tourné dans le sens inverse, et on tente d'évaluer l'influence des obstacles. Un seul paramètre n'est pas souvent mesuré, en tout cas pas souvent consigné, la température. Cassini dit, à deux reprises seulement, qu'elle est entre 4 et 6 degrés au-dessus de la congélation de l'eau, mais il est difficile de croire que la température n'a pas évolué pendant plusieurs jours.

<sup>324</sup> Cassini de Thury, ou César-François Cassini est le petit fils de Jean-Dominique Cassini qui a mené l'entreprise de mesure de la vitesse du son en 1677 avec Picard et Römer.

<sup>325</sup> Cassini de Thury, 'Sur la propagation du son', in Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, 1738, p.128-146.



Les conclusions sont ainsi :

La vitesse, par temps calme, est de 173 toises par seconde, et elle est sensiblement la même par vent de travers.

Le son se transmet à la même vitesse, quelle que soit son intensité.

La vitesse est la même par temps sec ou pluvieux.

La vitesse est la même de jour comme de nuit.

La vitesse est la même sur de courtes ou de longues distances.

La vitesse est la même selon l'orientation de la source sonore.

Le vent modifie la vitesse du son en ajoutant ou en retranchant la propre vitesse du vent.

Les accidents de terrain n'influent pas sur la vitesse du son.

Il semble que l'influence de la température ait fait débat, car les savants conviennent de procéder à des mesures « au cours d'un voyage [qu'ils vont] entreprendre par ordre du Roy dans la partie méridionale de la France. ».

Comme souvent, depuis que les savants sont rémunérés par la puissance publique, il convient d'échafauder des applications pratiques à usage civil ou militaire, et donc le mémoire s'achève sur un certain nombre de propositions pour évaluer les distances d'objectifs quelconques en utilisant cette méthode de mesure basée sur la vitesse du son.

## La vitesse du son dans l'Encyclopédie

Dans l'article 'son' de l'Encyclopédie, rédigé par D'Alembert, on trouve deux parties largement traitées, la production du son et le mécanisme des vibrations du corps sonore, et la vitesse de propagation, qui, comme on l'a vu agite sérieusement la communauté scientifique du XVIIIème siècle.

Voici les extraits traitant de la vitesse à l'article 'son' de l'encyclopédie :

[...] La vitesse du *son* ne diffère pas beaucoup, soit qu'il aille suivant ou contre la direction du vent. A la vérité le vent transporte une certaine quantité d'air d'un lieu à un autre, et le *son* est accéléré tandis que ses vagues se meuvent dans cette partie d'air, lorsque leur direction est la même que celle du vent. Mais comme le *son* se meut avec beaucoup plus de vitesse que le vent, l'accélération qu'il en reçoit est peu considérable. En effet, la vitesse du vent le plus violent que nous connaissions, est à la vitesse du *son* comme 1 est à 33 : et tout l'effet que nous apercevons que le vent peut produire, est d'augmenter ou de diminuer la longueur des ondulations; de sorte qu'au moyen du vent, le *son* puisse être entendu d'une plus grande distance qu'il ne le serait autrement. [...]

[...] Le célèbre M. Newton a donné à la fin du *second livre de ses Principes*, une théorie très ingénieuse et très savante des vibrations de l'air, et par conséquent de la vitesse du *son*. Sa théorie est trop compliquée et trop géométrique pour être rendue ici ; nous nous contenterons de dire qu'il trouve la vitesse du *son* par son calcul, à peu près la même que l'expérience la donne. Cet endroit des *Principes* de M. Newton, est peut-être le plus difficile et le plus obscur de tout l'ouvrage.

M. Jean Bernoulli le fils, dans son *Discours sur la propagation de la lumière*, qui a remporté le prix de l'Académie des Sciences en 1736<sup>326</sup>, dit qu'il n'oserait se flatter d'entendre cet endroit des *Principes*. Aussi nous donne-t-il dans la même pièce, une méthode plus facile et plus aisée à suivre que celle de M. Newton, et par le moyen de laquelle il arrive à la même formule qu'a donnée ce grand géomètre.

Un auteur qui a écrit depuis sur cette matière, prétend qu'on peut faire contre la théorie de MM. Newton et Bernoulli, une objection considérable; savoir, que ces deux auteurs supposent que le *son* se transmet par des fibres longitudinales vibrantes, qui se forment successivement, et qui sont toujours égales entre elles ; or cette hypothèse n'est point démontrée, et ne paraît point même appuyée sur des preuves solides. Le même auteur prétend que dans cette hypothèse, M. Bernoulli aurait dû trouver la vitesse du *son*, double de ce qu'il l'a trouvée, et de ce qu'elle est réellement. M.

<sup>326</sup> Jean Bernoulli (Jean II), *Recherches physiques et géométriques sur la question : comment se fait la propagation de la lumière*, proposée par l'Académie royale des sciences pour le sujet du prix de l'année 1736 , *Pièce qui a remporté le prix de l'Académie royale des sciences en l'année 1736*, Paris, 1737, pp.1-66.

Euler dans sa *Dissertation sur le feu*, qui a partagé le prix de l'Académie en 1738, a donné aussi une formule pour la vitesse du son; elle est différente de celle de M. Newton, et l'auteur n'indique point le chemin qui l'y a conduit. [...]

Vers le milieu du XVIIIème siècle, lorsque s'épanouit la controverse dite des 'cordes vibrantes', entre d'Alembert, Euler et Daniel Bernoulli, la détermination de la vitesse du son par le calcul devient un enjeu, et Euler y reviendra, ainsi que Lagrange un peu plus tard.

Malgré les efforts de ces mathématiciens, on ne parvient pas à expliquer la différence d'environ 20% entre la vitesse du son mesurée et celle qui est calculée.

La solution sera publiée par Laplace, lors de la lecture d'un mémoire *sur la vitesse du son dans l'air et dans l'eau*, le 23 décembre 1816, à l'Académie des Sciences de Paris<sup>327</sup>. Voici un résumé simplifié de ses conclusions, dans un langage actuel :

L'erreur de calcul de Newton trouve sa source dans une interprétation simple de la loi de Mariotte sur les gaz, dite loi des gaz parfaits, selon laquelle le rapport du produit  $PV / T$  est égal à une constante.

Les calculs de Newton reposent sur une variation rapide de la pression de l'air, due à ce qu'il nomme la 'force élastique', et donc du volume.

Les théories de la thermodynamique montrent que cette loi doit être corrigée dans le cas de variations rapides de la pression, que la température ne suit pas.

Cette transformation est alors dite adiabatique (sans échange de chaleur avec l'extérieur).

Il faut donc introduire un coefficient correcteur, appelé 'coefficient adiabatique'. Sa valeur est :  $\gamma = 1,4254$ , dont on prend la racine carrée pour corriger la loi de Mariotte.

Ce qui nous donne une valeur de :  $\sqrt{\gamma} = 1,194$ .

Appliqué aux résultats de Newton, le coefficient correcteur nous donne une vitesse du son tout à fait correcte, soit 1169 pieds par seconde, pieds de Londres bien entendu, ce qui nous fait environ 1092 de nos pieds de Paris, soit 182 toises parisiennes, ou 188 toises rhénanes, enfin bref nous sommes dans des valeurs correctes, proches de 340 m/s

---

<sup>327</sup> Laplace, *Oeuvres complètes*, t 14, p.297.

## 4 - La matière du son

### ***Le son est de nature corporelle***

La construction d'une nouvelle science, en ce début du XVII<sup>e</sup> siècle, passe par un dépassement critique des approches scolastiques et de la physique aristotélicienne. Les philosophes, chacun à sa manière, lorsqu'ils abordent la physique du son, commencent par une tentative d'établir le statut du son quant à sa matérialité. Ce qui peut sembler dérisoire dès la fin du siècle, et qui en général occupe une grande partie des textes sur le son, est justifié par une seule finalité, l'abandon de la nature 'qualitative' du phénomène sonore envisagé uniquement comme objet de la perception et de la sensation. On tente de remplacer cette notion chère à la Scolastique par une approche matérielle, voire corporelle, du son fondée sur l'observation. Bacon, Galilée, Mersenne et Descartes ont en commun avec les atomistes leur condamnation des 'espèces intentionnelles' et autres 'qualités successives' qui font partie du jargon des Scolastiques. En revanche, ces philosophes 'modérés' sur la question de la matérialité, rencontrent finalement moins d'opposition dans les milieux savants que les partisans d'Epicure, franchement corpuscularistes. Ces atomistes modernes, représentés principalement par Beeckman et Gassendi, proposent, comme les Anciens, une modélisation du son identifié à un flux de corpuscules émis par le corps sonore et venant percuter l'oreille.

L'atomisme est vigoureusement combattu par l'Eglise et les aristotéliciens. Le conflit date de l'époque d'Epicure dont les thèses présentant la matière comme un ensemble d'atomes insécables évoluant dans le vide ne pouvaient que se heurter à la physique du continu d'Aristote et de ses disciples. Lorsque l'Eglise des premiers temps tente d'établir une physique compatible avec la doctrine, l'épicurisme représente, par le matérialisme qu'elle induit, une voie impossible. Il est probable que les écrits d'Epicure aient été détruits aux premiers siècles de notre ère. Pendant longtemps ils n'ont été connus que par la *Vie des philosophes illustres* de Diogène Laërce, ainsi que par les textes des adversaires d'Epicure, comme Cicéron ou Sénèque. Quelques textes auraient néanmoins été préservés et soigneusement gardés dans la bibliothèque du Vatican. Jusqu'à la Renaissance, l'atomisme était identifié à cette approche païenne de la matière, et condamné par l'Eglise. Cependant, quelques savants du début de l'époque Moderne, en déclarant leur opposition au système d'Aristote fondé sur les quatre éléments sans pour autant se référer à une représentation de la matière alternative, sont tentés d'admettre les thèses atomistes. Dans un premier temps cette hypothèse de représentation est prudente. On la retrouve chez Francis Bacon, chez Galilée, et dans une certaine mesure chez Descartes qui parle de corpuscules plutôt que d'atomes. Cependant ces savants avaient toujours soin de déclarer clairement leur opposition au système défendu par Epicure et Lucrèce, et notamment en ce qui concerne la physique des sons.

### **Francis Bacon**

On considère généralement Francis Bacon comme un partisan de l'atomisme, malgré ses réticences affichées. Dans *Sylva sylvarum*, il utilise abondamment le langage atomiste, notamment les *species*, ou espèces, qu'elles soient visibles ou audibles. Cependant il peine à définir la nature du mouvement qu'il distingue nettement du mouvement local qui produit le son. L'atomisme baconien a peu à voir avec le flux des petits fragments de son d'Epicure.

Francis Bacon termine son long exposé sur le son par une vigoureuse attaque contre le corpuscularisme et le matérialisme de Lucrèce, en invoquant la réflexion des sons<sup>328</sup> :

La répercussion des sons (que nous nommons écho) est un argument sérieux de l'essence immatérielle (*spiritual*) des sons. En effet, s'ils étaient corporels, la répercussion devrait être créée de la même manière et par les mêmes instruments que le son original. Or nous voyons qu'un grand nombre d'organes précis (*exquisite instruments*) est requis pour prononcer des mots, alors qu'il n'y a rien de tel lors de leurs retour, mais seulement une surface qui arrête et répercute.

L'argument, apparemment de bon sens, développé ici par Francis Bacon est surtout destiné à indiquer qu'il ne transgresse pas la limite de l'acceptable en invoquant le matérialisme épicurien. Quelques lignes plus loin il écarte la modélisation des 'empreintes' chère à Epicure. Bacon pourtant ne définit pas de modèle concernant la propagation des sons, si ce n'est par le mouvement d'un air confiné qui résiste après qu'il a subi un choc. Lorsque Bacon affirme que le son est de nature immatérielle, il veut dire qu'il n'est pas constitué de corpuscules, mais ce n'est que pour évoquer une nature encore inconnue, qui n'a rien à voir avec la 'qualité' aristotélicienne. Ce passage est situé à la fin des deux chapitres consacrés aux sons, et il apparaît plutôt comme une invitation à poursuivre la recherche que comme une condamnation d'un système.

<sup>3</sup> Francis Bacon, *Sylva sylvarum*, in *Philosophical works* t 2, ed. Spedding, London, 1859 centurie III, 287, p. 435, traduction personnelle.

## Descartes

La physique de Descartes se rapproche de celle des atomistes par son matérialisme et par l'idée de parties constituant la matière, et notamment l'air. Toutefois cette physique refuse l'insécabilité des parties constitutives de la matière, ainsi que l'idée du vide nécessaire à la théorie corpusculaire. Descartes refuse la théorie atomiste.

Le jeune Descartes disserte volontiers, dans le *Compendium musicae* (*Abrégé de musique*) notamment, sur la nature musicale des sons, que ce soit pour en déterminer les intervalles consonants, ou pour tenter d'établir une mécanique musicale qui fonctionne selon le principe de la future 'basse fondamentale' de Rameau, c'est-à-dire le son grave générateur de l'accord parfait. Mais Descartes s'étend peu sur la nature physique du son. La première page du *Compendium musicae* de 1618 indique bien la distance qu'il prend avec la physique des sons :

L'objet de la musique est le son. Sa fin est de plaire, et d'exciter en nous diverses passions. [...] Les moyens pour cette fin, c'est-à-dire les propriétés du son les plus remarquables sont deux, savoir, ses différences considérées par rapport au temps ou à la durée, et par rapport à la force ou à l'intention du son, considéré en tant que grave ou aigu. Car quant à la nature et à la qualité du son, savoir de quels corps, et de quels moyens on doit se servir pour le rendre plus agréable, cela regarde les Physiciens.

C'est clair, Descartes ne s'intéresse qu'à la fonction musicale des sons, selon la durée, l'intensité et la hauteur. L'approche de la physique des sons de Descartes est semblable à celle des Scolastiques, c'est-à-dire une étude de la perception, et une analyse approfondie des aspects musicaux, c'est-à-dire les consonances et les intervalles, en utilisant le seul instrument de mesure adapté à cette étude, le monocorde. Descartes n'écrit pas, dans toute son œuvre publiée, sur la nature du son et sur sa propagation, sauf dans sa correspondance. C'est ainsi que Descartes aborde le sujet vers 1630, avec Beeckman (avec qui il est brouillé depuis peu) ou avec Mersenne lorsque celui-ci rédige son *Harmonie Universelle*.

Dans les *Principes de la philosophie*, texte qui constitue le fondement de la physique de Descartes, le son est abordé très brièvement dans la quatrième partie, à l'occasion de la description de l'organe de l'ouïe<sup>329</sup> :

Le quatrième [sens] est l'ouïe, qui n'a pour objet que les divers tremblements de l'air. Car il y a des nerfs au dedans des oreilles tellement attachés à trois petits os qui se soutiennent l'un l'autre, et dont le premier est appuyé contre la petite peau qui couvre la concavité qu'on nomme le tambour de l'oreille, que tous les divers tremblements que l'air de dehors communique à cette peau sont rapportés à l'âme par ces nerfs, et lui font ouïr autant de divers sons.

Descartes considère le phénomène sonore avant tout comme une sensation et ne lui accorde pas, semble-t-il, d'existence matérielle en dehors de la perception. En cela son approche n'est pas très différente de celle des Scolastiques, et on est surpris de constater l'absence de toute étude de la physique des sons chez un savant qui pourtant prétend couvrir l'ensemble de la connaissance de la nature (« Et ainsi je puis démontrer par un dénombrement très facile qu'il n'y a aucun phénomène en la nature dont l'explication ait été omise en ce traité. »<sup>330</sup>). L'explication de cet embarras se trouve dans le traitement cartésien du mouvement<sup>331</sup> :

Or le mouvement (à savoir celui qui se fait d'un lieu en un autre, car je ne conçois que celui là, et je ne pense pas aussi qu'il en faille supposer d'autre en la nature), le mouvement donc, selon qu'on le prend d'ordinaire, n'est autre chose que l'action par laquelle un corps passe d'un lieu dans un autre.

On sait que Descartes, ici, s'attaque aux catégories aristotéliennes, et à ces 'mouvements de qualité' (*aloiosis*) qui ne signifient rien pour lui. Cependant la double exigence de Descartes envers, d'une part la nécessaire substance matérielle de ce qui est, et d'autre part le mouvement qui n'est que le déplacement d'un corps, rencontre un obstacle sérieux dans une éventuelle tentative de modélisation de la propagation des sons qui de surcroît ne peut accepter l'hypothèse atomiste. Le refus de Descartes d'accepter l'idée d'un mouvement sans transport de matière lui ferme la possibilité d'une étude approfondie du phénomène sonore. C'est ce même refus qui a conduit Aristote et les Scolastiques à nier tout mouvement lors de la propagation du son, si ce n'est celui du corps sonore, et éventuellement les 'tours et retours' des parties d'air qui portent le son. La seule approche possible reste l'audition à l'exclusion de toute étude physique. L'approche qualitative des sons par la perception est une fois de plus une impasse.

<sup>329</sup> René Descartes, *Les principes de la philosophie*, in 'Œuvres de Descartes', t 3., ed. V. Cousin, Paris, Levrault, 1825, p. 506.

<sup>330</sup> *Id.*, p. 512.

<sup>331</sup> *Id.*, p. 139.

Toutefois, dans la correspondance de Descartes on trouve, ça et là, quelques bribes d'une théorie physique des sons. C'est ainsi dans une longue lettre, de décembre 1629<sup>332</sup>, répondant à Mersenne qui le questionne sur divers sujets, Descartes évoque plusieurs aspects de la nature du son, et renvoie sans élégance Beeckman avec qui il vient de se brouiller, à sa théorie atomiste en travestissant ses propos<sup>333</sup> :

La même partie d'air, *in individuo*, qui sort de la bouche de celui qui parle, va frapper toutes les oreilles.

Cette traduction approximative ne reflète pas la pensée de Beeckman et Descartes n'hésite pas à la qualifier de 'ridicule' en l'assimilant rapidement et de façon caricaturale aux thèses de Lucrèce.

Descartes fait la distinction classique entre, d'une part, le 'son' (la voix, *φωνη*, du musicien grec) qui est caractérisé par une durée et une hauteur, et, d'autre part, le bruit, essentiellement ponctuel et sans hauteur identifiable. Cette distinction scolastique permet de s'affranchir de la théorie du son en ne retenant que le son musical comme objet d'études digne d'intérêt. A plusieurs reprises, dans sa correspondance, notamment avec Mersenne, Descartes aborde les causes des consonances. C'est ainsi que dans une lettre de 1631, Descartes décrit ce qu'on appelle souvent la 'théorie de la coïncidence des coup'<sup>334</sup> :

Il faut supposer que le son n'est autre chose qu'un certain tremblement d'air qui vient chatouiller nos oreilles, et que les tours et retours de ce tremblement se font d'autant plus vite que le son est plus aigu ; en sorte que deux sons étant à l'octave l'un de l'autre, le plus grand ne fera trembler l'air qu'une fois, pendant que le plus aigu le fera trembler justement deux fois, et ainsi des autres consonances. Enfin, il faut supposer que lorsque deux sons frappent l'air en même temps, ils sont d'autant plus accordants, que leurs tremblements se rencontrent plus souvent l'un avec l'autre, et qu'ils causent moins d'inégalité dans le mouvement du corps de l'air [...]

Descartes écrit en note :

J'ai abusé du mot de tremblement, que je prends pour chacun des coups ou petites secousses que se meut le corps qui tremble.

Si Descartes adopte la position alors traditionnelle de la coïncidence des coups issue des observations des cordes vibrantes, il ne précise toutefois pas de quelle façon ces tremblements se propagent, mais la lettre précédemment citée de 1629 nous donne quelques éclaircissements sur la théorie de Descartes.

Dans le *De audibilibus* de Straton-Aristote que Descartes a lu, on explique la discrétisation du son formé d'une succession d'événements, et Descartes expose le même principe<sup>335</sup> :

[...] si le son ne frappe l'oreille qu'une seule fois, il est bien entendu comme bruit, mais non pas distingué comme son qui soit grave ou aigu. Il faut pour cela qu'il frappe l'oreille au moins deux ou trois fois afin que, par l'intervalle qui est entre deux battements, on estime combien il est grave ou aigu [...].

Cette modélisation, péripatéticienne mais adoptée par Descartes, est d'ailleurs sensiblement en contradiction avec Aristote lui-même, puisque dans le *Traité de l'âme* le son est décrit comme un ébranlement d'une masse d'air continue entre le corps sonore et l'oreille. Le *De audibilibus*, rappelons-le, propose, dès son premier paragraphe, un ébranlement de la partie d'air contiguë au corps sonore, qui chasse la partie qui lui est immédiatement conjointe, constituant ainsi une succession de chocs de parties d'air dont la 'dernière' vient frapper l'oreille, les intervalles entre ces chocs déterminant la hauteur de son<sup>336</sup>. Quoi qu'il en soit, Descartes semble bien ici être l'interprète de cette théorie, faute d'une modélisation plus adaptée.

<sup>332</sup> Descartes, Lettre à Mersenne du 18 décembre 1629, in *Correspondance*, ed. Cousin, Paris, Levrault, 1824,, t 6, p. 91.

<sup>333</sup> La phrase de Beeckman est : « Soni materia quae auribus ingreditur auditum motura est ille *idem* numero aer, qui erat in ore loquentis ». Voir plus loin la partie consacrée à la théorie corpusculaire du son.

<sup>334</sup> Descartes, Lettre à Mersenne de janvier 1631, in *Correspondance*, ed. Cousin, Paris, Levrault, 1824, t 6, p 187.

<sup>335</sup> Descartes, Lettre à Mersenne du 18 décembre 1629, in *Correspondance*, ed. Cousin, Paris, Levrault, 1824,, t 6, p. 90.

<sup>336</sup> Il convient ici encore une fois de distinguer cette théorie de la théorie ondulatoire pas encore élaborée. En effet, il s'agit ici d'une partie d'air qui chasse la suivante pour prendre sa place, et non de la propagation immatérielle d'une déformation élastique de cette partie d'air qui reprend sa place après l'ébranlement, ce qui constitue la théorie ondulatoire. Un vocabulaire anachronique a souvent induit en erreur les commentateurs postérieurs qui analysaient ce texte avec les acquis de la connaissance en acoustique, notamment au XIX<sup>ème</sup> siècle A ce sujet, voir Partie I, chap. 3, les commentaires de l'article de Thomas Young sur le *De audibilibus*.

Cette modélisation, fondée sur une succession de coups, est généralement acceptée par les physiciens, comme Galilée et Francis Bacon, qui se démarquent d'une part de l'atomisme et de ses flux de corpuscules sonores, et d'autre part des aristotéliens qui considèrent le son comme un mouvement d'air continu entre le corps sonore et l'oreille. En adoptant cette représentation médiane et consensuelle, Descartes prend ses distances avec la théorie des 'tours et retours' du corps sonore et des parties d'air conjointes. Pourtant cette proposition, la théorie des coups, qui a souvent été considérée rapidement comme une ébauche du mouvement vibratoire, est déjà exprimée par Robert Grosseteste quatre siècles auparavant, et reprise par nombre de physiciens tels que Fracastoro, Benedetti ainsi que par Mersenne.

Dans cette même lettre à Mersenne de décembre 1629, Descartes expose cette vision assez inattendue, de la propagation des sons<sup>337</sup> :

"revoyant vos lettres, je trouve avoir oublié de répondre à une objection touchant les sons, qui sont certainement, ainsi que vous le dites, un battement qui se fait à plusieurs tours et retours, sans que vous objectiez du son d'une balle de mousquet empêche ou convainque du contraire. Car ces retours sont seulement requis en l'air qui frappe l'oreille, et non point au corps qui engendre le son : et encore qu'ils se rencontrent aux cordes, vous voyez toutefois qu'au vent avec lequel on fait sonner les flûtes, il n'y a non plus de retours qu'à un boulet de canon. Mais cela n'empêche pas qu'ils fassent ondoyer l'air qui va frapper l'oreille, de même qu'une pierre entrant tout droit dans l'eau ne laisse pas de faire plusieurs cercles qui se suivent les uns les autres."

Cette fois, le son n'est plus une succession de coups, mais 'un battement qui se fait à plusieurs tours et retours' lesquels font ondoyer l'air. L'ondoiement de Descartes n'est pas à comprendre comme un mouvement vibratoire envisagé globalement, mais comme une succession de battements qui se succèdent, sans décrire précisément en quoi consistent ces battements. En effet, Descartes en contestant l'existence des 'retours' lors de sons émis par une flûte ou lors d'un tir au mousquet, suppose que la production du son peut se faire sans vibration du corps sonore. Il fait ainsi de la vibration des cordes une source sonore particulière. Et pourtant, ces sources sonores sont capables de faire 'ondoyer' l'air, c'est-à-dire de produire des chocs successifs des parties d'air, avec un retour dont on n'a pas vraiment la description.

Si on rapproche ces lignes de celles citées plus haut, on entrevoit que la hauteur du son est corrélée à la durée de l'intervalle entre ces chocs successifs, et l'intensité, on l'imagine, à la force de ces chocs. Rien n'est dit sur le timbre, ou la 'figure' des sons qui ne se modifie pas dans sa propagation. Mais plus encore, cette hypothèse n'explique pas la conservation de la nature du son lors de chocs contre un obstacle, ce qu'avait pourtant bien relevé Francis Bacon, ni comment peut se faire la superposition de plusieurs sons sans qu'ils ne se perturbent. Pourtant, dans son *Abrégé de musique*, Descartes avait bien relevé la coexistence de plusieurs sons lors de la vibration d'une corde tendue, et lors de la vibration d'une autre corde par 'sympathie'.

Enfin, la modélisation par les chocs successifs des parties d'air ne décrit pas le résultat d'un choc de deux parties d'air, face à face, par exemple, provenant de deux sons différents, ou même d'une réflexion. Selon cette logique, les sons devraient se répercuter et revenir à leur point de départ, à moins d'imaginer que les parties glissent l'une sur l'autre afin d'aller bousculer uniquement celle qui est concernée par le trajet du son... Autrement dit, après avoir dit que la propagation est sphérique, en partant du lieu de production sonore, on doit s'imaginer que le choc d'une partie d'air se fait sur la conjointe suivant un certain axe qui serait la direction du son. Que dire alors des parties d'air qui cohabitent avec ces deux-là mais qui restent immobiles ? Décidément la modélisation par les chocs de parties d'air est bien délicate à établir, et Descartes est sans aucun doute un peu troublé de ces imperfections. Alors, bien entendu, la modélisation des ronds dans l'eau vient au secours de l'hypothèse, sans que l'on sache s'il s'agit d'une comparaison ou d'une analogie exacte (les sons font « ondoyer l'air, de même qu'une pierre entrant tout droit dans l'eau ne laisse pas de faire plusieurs cercles qui se suivent les uns les autres. »).

Descartes revient, à plusieurs reprises dans sa correspondance avec Mersenne, sur la nécessité pour l'oreille de recevoir deux coups au moins pour déterminer la hauteur d'un son. Il en fait même le sujet d'une querelle dans une lettre orageuse à Beeckman, et avoue à cette occasion que cette théorie n'a rien de nouveau puisqu'elle est développée par Aristote (en fait par Straton dans le *De audibilibus*). Pourtant dans cette même lettre, il semble que Descartes ait, à un moment, adopté la position de Beeckman sur la théorie des coups, et se soit donc rapproché de la thèse corpusculaire<sup>338</sup>.

<sup>337</sup> *Id.* p. 88.

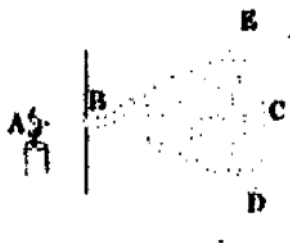
<sup>338</sup> René Descartes, Lettre à Beeckman du 17 octobre 1630, in *Correspondance*, ed. Cousin, Paris, Levrault, 1824,, t 6, p. 154.

De son côté, Mersenne revient à la charge, il était alors en pleine rédaction de l'*Harmonie Universelle*, et sollicite son ami Descartes sur l'atténuation du son avec la distance. Descartes lui répond, et revient sur le sujet de la propagation des sons. Avec honnêteté, il avoue son incompetence<sup>339</sup> :

La plupart de ce que vous me proposez en votre dernière (lettre) me semble tout à fait impossible. Comme premièrement, de déterminer à quelle distance un son peut être entendu; car cela ne suit pas les proportions de musique, mais il dépend de quatre ou cinq choses différentes, lesquelles étant toutes supposées, il ne reste plus rien à déterminer pour la raison. Secondement, c'est tout de même de vouloir déterminer combien le sifflement d'un boulet de canon ou d'une corde, porté par l'air, sera grave ou aigu; de quoi véritablement il est impossible d'avoir autre chose que des conjectures, et je suis bien aise de ne rien écrire que je ne sache.

En revanche, quelques mois plus tard, dans une autre réponse à Mersenne Descartes fait une remarque pertinente sur la différence de propagation entre le son et la lumière<sup>340</sup> :

Je ne crois point que le son se réfléchisse en un point comme la lumière ; d'autant qu'il ne se communique point comme elle par des rayons qui soient tout droits, mais il s'étend toujours en rond de tous côtés. Par exemple, si le corps A rend de la lumière, le rayon de cette lumière qui passe par le trou B ne pourra être vu qu'en ligne droite BC ; mais si le même corps A rend quelque son, ce son, passant par le trou B, ne sera guère moins bien entendu vers D et vers E que vers C.



Cette remarque, inspirée directement par Francis Bacon, mérite une certaine attention, parce que longtemps encore après Descartes, la théorie du 'rayon sonore' trouvera un certain succès auprès de nombre de savants. Descartes décrit et explique le phénomène par un croquis que reprendra Newton dans les *Principia*. Quelques lignes plus loin, Descartes répond à une question de Mersenne sur la réfraction des sons, et il fait preuve de moins de sagacité<sup>341</sup> :

La réfraction des sons ne peut se mesurer exactement, non plus que leur réflexion. Mais autant qu'elle peut être observée, il est certain qu'elle se doit faire *a perpendiculari in aqua*.

Cette réflexion mériterait un développement... Cependant, il arrive que Descartes, toujours en réponse à Mersenne, revienne sur sa modélisation de la propagation des sons, à nouveau nettement inspirée de Straton-Aristote, comme ici, en avril 1633<sup>342</sup> :

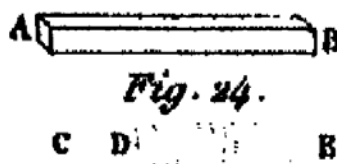
Premièrement, vous demandez pourquoi le son est porté plus aisément le long d'une poutre qu'on frappe, qu'il n'est dans l'air seul : ce que je réponds arriver à cause de la continuité de la poutre, qui est plus grande que celle des parties de l'air : car, si vous faites mouvoir le bout de la poutre A, il est évident que vous faites mouvoir au même instant l'autre bout B; mais, si vous poussez l'air en l'endroit C, il faut qu'il s'avance au moins jusqu'à D, avant que de faire mouvoir E, à cause que ces parties obéissent ainsi que celles d'une éponge ; or il emploie du temps en passant depuis C jusqu'à D, et perd cependant une partie de sa force : d'où vient que le son, qui n'est autre chose que le mouvement de l'air, sera entendu plus vite et plus fort au point B qu'au point E. D'où il est facile de résoudre aussi votre quatrième question, où vous demandez pourquoi le son s'entend beaucoup plus vite que l'air ne se peut mouvoir; car vous voyez que, poussant la partie de l'air qui était au point C, elle n'a pas dû passer jusqu'à E pour y faire entendre le son, mais seulement jusqu'à D, et ainsi que pendant le temps que l'air a pu se mouvoir depuis C jusqu'à D, le son a passé depuis C jusqu'à E, qui en sera, si vous voulez, mille fois plus éloigné.

<sup>339</sup> René Descartes, Lettre à Mersenne du 25 février 1630, in *Correspondance*, ed. Cousin, Paris, Levrault, 1824,, t 6, p. 113.

<sup>340</sup> René Descartes, Lettre à Mersenne, juin 1633, in *Correspondance*, ed. Cousin, Paris, Levrault, 1824,, t 6, p. 231.

<sup>341</sup> *Id.*

<sup>342</sup> René Descartes, Lettre à Mersenne d'avril 1633, in *Correspondance*, ed. Cousin, Paris, Levrault, 1824,, t 6, p. 228.



Encore un fois, le son semble, selon cette théorie, ne se déplacer qu'en ligne droite, mais surtout on a l'impression que les chocs ne se font qu'en direction des parties d'air se trouvant sur cet axe<sup>343</sup>.

On relève une contradiction entre le début et la fin de ce passage. En effet, on comprend d'abord que l'air se meut, comme la poutre, en une masse. Et donc la propagation du son, « qui n'est autre chose que le mouvement de l'air », prend un certain temps, du fait de sa structure d'éponge. Ensuite on lit que le son a son propre mouvement, plus rapide que le mouvement d'air associé (« pendant le temps que l'air a pu se mouvoir depuis C jusqu'à D, le son a passé depuis C jusqu'à E »). On suppose alors que ce mouvement est celui de la perturbation, et cette idée est nouvelle et intéressante. Cette dissociation entre le mouvement de l'air, qui est réellement un transport de matière, et celui du son, qui semble ici avoir son existence propre, est l'amorce d'une étude que pourtant Descartes n'entreprendra pas.

Faute de disposer d'une théorie plus complète de Descartes sur la nature des sons, on est contraint de conjecturer. S'il admet que des retours peuvent se produire dans l'oreille, c'est néanmoins l'air qui vient frapper l'oreille, et donc, puisqu'il ne peut pas contester l'existence d'un mouvement, il s'agit bien d'un mouvement d'air. Toutefois, puisqu'il n'admet pas l'existence d'un mouvement sans transport de matière, Descartes est contraint d'attribuer aux sons une nature matérielle, dont le mouvement des entités, les parties d'air, ne peut se faire que dans un sens, celui du mouvement du son. Alors, le son serait un mouvement de matière ? Descartes refuse de s'engager dans cette voie périlleuse. Il ne peut qu'admettre les retours dans les vibrations des cordes, puisqu'on les observe, mais on sent nettement que la question de la nature de la propagation du son le gêne dans le cadre de sa physique, et pour les mêmes raisons qu'Aristote et ses successeurs. Le recours à la sempiternelle analogie des ronds dans l'eau exprime bien son désarroi.

Outre l'absence d'explication sur la conservation du timbre et sur la superposition des sons, la théorie des coups explique mal la réflexion des sons sur un obstacle avec conservation du caractère du son, et d'ailleurs le silence des adeptes de la théorie des coups, sur ce point, est révélateur. En effet, cette théorie admet que les coups portés par l'air font vibrer non seulement l'oreille, mais éventuellement un autre corps sonore situé à proximité, ce qu'on appelle la résonance par sympathie. La réflexion des sons, et notamment l'écho, devrait alors se faire seulement sur des corps capables de vibrer et donc de rendre le son qu'ils ont perçus, mais dans ce cas avec la sonorité de ce même corps. Comme Descartes n'aborde jamais le phénomène de l'écho, nous n'en saurons donc pas plus.

Que ce soit dans les *Principes de philosophie*, ou bien dans ses traités d'optique, de mécanique ou d'algèbre, Descartes n'évoque jamais la propagation des sons, ne serait-ce que pour tenter une description et une explication de l'écho. Il est donc difficile, à partir de courts extraits de sa correspondance, de cerner une cohérence de la modélisation du son chez Descartes.

## Mersenne

On retrouve la même défiance envers les atomistes chez Mersenne que chez Bacon ou Descartes. Toujours prudent, il semble rejeter un matérialisme qu'il ne condamne pourtant pas toujours. En effet, il fait de l'atomisme un simple système de représentation de la matière qui mérite juste l'attention, au même titre que celui des aristotéliens. Tout au plus il semble renvoyer dos à dos ces deux approches, mais comme étant désuètes et incompatibles avec l'expérience. A plusieurs reprises, dans le livre I de l'*Harmonie Universelle*, consacré à la nature physique du son, Mersenne évoque Démocrite et Epicure. Cependant, s'il n'adhère pas aux thèses des petits corps de son, il énonce cette représentation comme une 'imagination' des Anciens qu'il est malgré tout légitime d'exprimer<sup>344</sup> :

<sup>343</sup> Quelque cinquante années plus tard, Huygens proposera l'analogie des séries de boules alignées et suspendues, que l'on choque d'un côté ou de l'autre et qui conservent l'information du choc (Traité de la lumière).

<sup>344</sup> Marin Mersenne, *Harmonie Universelle*, Paris, 1636, ed. CNRS, 1963, livre I, prop. 2, corol., p. 6. Adapté en français moderne.



Puis que je désire que le Musicien parfait sache la Philosophie, et qu'il doit connaître les différentes imaginations que nos ancêtres ont eu de la nature du Son, afin que l'on n'entame nul discours de l'harmonie dans toutes sortes de compagnies où il se rencontre, dont il ne puisse rendre raison, il faut remarquer en sa faveur que Démocrite, Epicure et quelques autres de leur secte ont estimé que le Son qui se fait par la rencontre, ou le battement de toutes sortes de corps n'est autre chose qu'un mouvement, ou une saillie de petits corps composés d'atomes, qui sortent des corps qui font le Son, comme les rayons sortent du Soleil, ou qui sont dans l'air, et qui étant frappés par le mouvement des corps, s'étendent de tous côtés par les pores, ou les petits vides dudit air, jusqu'à ce qu'ils ne rencontrent plus de vide, et qu'ils soient arrêtés par les petits corpuscules, ou atomes qui composent la substance de l'air; de sorte que suivant cette opinion l'on peut s'imaginer une grande multitude de petits corps invisibles, ou d'atomes qui volent dans l'air après qu'il a été battu, et qui vont affecter toutes les oreilles qui se rencontrent dans leur chemin, afin de leur porter la nouvelle de ce qui s'est passé dans l'air, ou dans les corps dont ils sont partis, et dont ils sont les ambassadeurs, ou les images et les représentations.

Ici est évoquée l'autre difficulté pour admettre le paradigme corpusculaire, c'est la nécessité de l'existence du vide. Lorsque Aristote parle du son se propageant dans le vide, au chapitre 8 du second livre du *Traité de l'âme*, il évoque bien entendu l'air, et précise bien cette notion (« *On dit avec raison que le vide est la cause déterminante de l'audition, car, dans l'opinion commune, le vide c'est l'air, lequel est bien la cause efficiente de l'audition, quand il est mêlé comme une masse continue et une.* »). En revanche l'existence du vide est nécessairement contenue dans la conception atomiste de la matière, et notamment dans la constitution de l'air. Cette idée est fondamentalement impossible pour la science chrétienne, et donc le son ne peut être constitué de corpuscules en mouvement dans le vide.

Pourtant Mersenne est prêt à admettre l'idée du déplacement de corps dans l'air, et il se fait conciliant envers les atomistes qu'il récuse sans animosité, à propos du mouvement nécessaire au son<sup>345</sup> :

Quant au mouvement de l'un et de l'autre de ces airs, nul ne doute qu'il ne soit nécessaire, car encore que quelques-uns croient que ce n'est pas l'air qui fait le Son, mais que ce sont les corps qui se meuvent dans l'air, néanmoins ils avouent qu'il est nécessaire qu'ils se meuvent [...]

Plus loin, il évoque encore Démocrite<sup>346</sup> :

Quelques-uns s'imaginent que la même partie de l'air qui est battue, et qui fait le Son, se divise en une infinité de petites parcelles, semblables aux atomes de Démocrite, qui s'étendent en rond pour porter le Son de tous côtés: mais cela n'est pas nécessaire, et il n'y a nulle raison qui puisse persuader que la partie de l'air qui est frappée, se détache de l'air auquel elle est continue, pour aller se rejoindre à un autre air éloigné de deux ou trois mille pas: il suffit qu'elle ébranle l'air continu, et qu'elle lui communique le même mouvement qu'elle a reçu, quoique plus faiblement et avec diminution.

Ici l'atomisme est présenté comme une représentation qu'il n'est pas nécessaire de construire, puisque la physique du continu, concession faite ici à Aristote, permet très bien de s'accommoder du mouvement de parties d'air. On perçoit ici les débats que Mersenne a sans doute eu avec Beeckman et son ami Gassendi à ce sujet.

---

<sup>345</sup> *Id.*, prop. 3, p.7.

<sup>346</sup> *Id.*, prop. 5, p.9.

## Intermède – Galilée et la trace des vibrations

Galilée a peu écrit sur la nature physique du son. Cependant, dans son dernier ouvrage, les *Discorsi*, il étudie la chute des corps, les oscillations isochrones du pendule, et aussi les vibrations des cordes. On peut considérer Galilée comme un des premiers théoriciens du mouvement vibratoire. Galilée est un mathématicien, il a besoin de mesurer pour comprendre et pour établir des lois. Pour mesurer, il faut pouvoir observer les phénomènes, et lorsqu'ils sont fugitifs, il faut pouvoir en préserver la trace, afin de *peser, compter, mesurer*. C'est ce que Galilée propose, en se souvenant d'une 'aventure physique' qui lui est arrivée, lorsqu'un jour il grattait une plaque de cuivre avec un couteau, dans un grincement insupportable. Ces grincements laissent des 'virgules' sur la plaque de cuivre, et Galilée entreprend de mesurer leurs espacements et de confronter ces mesures avec la hauteur du son et la vitesse du mouvement. L'expérience a été reproduite et les analyses sont présentées ici<sup>347</sup>.

### La physique des sons, une préoccupation tardive chez Galilée

Le père de Galilée, Vincenzo, était luthiste et théoricien de la musique, comme son maître Zarlino avec qui il entre en conflit dans les années 1580. Face à l'approche numérique, voire numérolologique, de Zarlino, Vincenzo propose une approche pragmatique fondée sur le tempérament égal pour accorder les instruments. Musicien lui-même, il se fait l'ardent défenseur, contre la polyphonie et l'art du contrepoint alors en plein essor dans la musique italienne, de la monodie et du récitatif chanté. Au sein de la *Camerata* de Bardi, qui regroupe, autour de quelques nobles cultivés, des musiciens florentins adeptes de cette 'musique moderne', Vincenzo pratique le luth et compose quelques madrigaux. C'est ce courant musical à la recherche de la pureté de la musique antique, qui sera bientôt à l'origine de l'opéra avec Peri et son *Euridice* (1600), puis avec Monteverdi et l'*Orfeo* (1607). Vincenzo Galilei, également théoricien de la musique et parfois même expérimentateur<sup>348</sup>, est l'auteur de trois ouvrages publiés sur la théorie musicale, dont le dernier est un vigoureux pamphlet contre son ancien maître<sup>349</sup>.

Après la mort de son père en 1591, Galilée, âgé alors de 27 ans, commence réellement à s'affirmer comme 'chercheur'. Il quitte l'université de Pise où il occupe un poste peu rémunéré pour celle de Padoue, et entreprend d'étudier la mécanique tout en réalisant quelques instruments de mesure comme son fameux compas. Pendant toute cette 'première' période de la vie de Galilée, consacrée essentiellement à des recherches sur la mécanique (chute des corps, mouvement des projectiles, pendules...), on ne trouve aucune trace d'une quelconque préoccupation liée à la musique et à l'étude des sons en général. Une recherche textuelle, effectuée sur l'œuvre en italien (correspondance et ouvrages avant 1610), par troncatures de mots clefs (music-, audi-, suon-, liut-, vibra-, frequen-,...) ne donne aucune indication sur des écrits ou des recherches de Galilée sur le sujet. Dans une lettre de 1602, il remercie son interlocuteur de lui avoir fait parvenir le livre de Girolamo Mei, musicien et ami de Vincenzo, réédité cette année-là. C'est la seule allusion pertinente à la musique dans les écrits de Galilée avant 1610. Pourtant Galilée a reçu une éducation musicale, comme deux de ses frères qui sont musiciens. Il est probable qu'il ait assisté aux recherches de son père sur l'accord du luth ou la tension des cordes, et il serait étonnant qu'il n'ait pas lu ses ouvrages. Malgré cet environnement favorable, Galilée ne semble s'intéresser, très succinctement d'ailleurs, à la physique des sons qu'en 1633, après son procès et alors âgé de près de 70 ans.

Cependant, en mai 1610, peu avant son retour à Florence, Galilée écrit à Belisario Vinta. Il lui fait part de son intention d'écrire un certain nombre d'ouvrages traitant de mécanique et du mouvement, puis, « *Ho anco diversi opuscoli di soggetti naturali, come De sono et voce, De visu et coloribus, De maris estu, De compositione continui, De animalium motibus...* »<sup>350</sup>. Galilée envisageait donc en 1610 d'écrire un traité sur le son et la voix. Mais aucun de ces textes ne verront le jour : on sait que s'ouvre alors pour Galilée une longue période de recherches dans le domaine de l'astronomie, qui se terminera en 1633 par un procès fameux et par sa renonciation. Pendant toutes ces années il délaisse la mécanique et ne semble s'intéresser qu'au « *Système du Monde* ». Contraint par la sentence pontificale d'abandonner l'astronomie, il entreprend dès 1633 la rédaction des *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno à due nuove scienze attenenti alla mecanica & i movimenti*

<sup>347</sup> Ce chapitre est essentiellement constitué par l'article suivant :

François Baskevitch, 'L'élaboration de la notion de vibration sonore : Galilée dans les *Discorsi*', in *Revue d'Histoire des Sciences*, 60-2, A. Colin, Paris, 2007, pp.387-418.

<sup>348</sup> Voir à ce sujet, Claude V. Palisca, 'Was Galileo's father an experimental scientist?', in V. Coelho, *Music and science in the age of Galileo*, Dordrecht, Kluwer, 1984, p. 143-151.

<sup>349</sup> Vincenzo Galilei, *Discorso intorno all'opere di messer Gioseffo Zarlino da Ghioggia*, Florence, G. Marescotti, 1589.

<sup>350</sup> Galileo Galilei, *Le Opere*, Florence, Ed. Nazionale, 1898, Vol. X, p.352.

*locali* qui seront publiés en 1638. Dans cet ouvrage majeur, Galilée reprend la forme d'une conversation entre un savant, un élève et un aristotélécien, comme dans le *Dialogo*. Cette forme littéraire et rhétorique d'influence très platonicienne, avait déjà été employée par son père dans son ouvrage théorique sur la musique<sup>351</sup>.

### Des oscillations du pendule aux cordes vibrantes

La version initiale des *Discorsi* comprend quatre chapitres, nommés journées, dont la première est consacrée essentiellement à l'étude de la matière et de sa résistance, à la chute des corps, et au pendule.

La démarche de Galilée, dans cette journée, est double : d'une part il traite tour à tour de différentes formes du mouvement local, d'autre part, dans un souci pédagogique, il opère des analogies successives entre ces différents types de mouvement. Galilée est coutumier du raisonnement analogique, si puissant mais tellement délicat à manier. Pour Galilée le son est mouvement. Dès lors, son étude s'inscrit naturellement dans l'étude du mouvement local. Les transitions paraissent presque naturelles, de la chute des corps aux mouvements du pendule, puis des oscillations des cloches aux cordes de la cithare.

Galilée nous parle du pendule, et remarque que la durée de ses oscillations est déterminée (*prefisso*), et qu'« il est impossible de l'amener à se mouvoir avec une période différente de son unique période naturelle. »<sup>352</sup>. C'est alors que Sagredo décrit le geste du sonneur de cloches, aisé lorsqu'il donne des impulsions à certains instants, et dont il est si difficile de ralentir le mouvement, une fois qu'il est établi. L'analogie avec les vibrations des cordes se précise.

Galilée saute sur l'occasion fournie par une comparaison avec un instrument de musique pour nous amener à l'étude des vibrations sonores. L'analogie entre le mouvement du pendule dont la durée des oscillations est constante et proportionnelle à la racine carrée de sa longueur, et la vibration sonore des cordes dont la hauteur est constante et liée à sa longueur, est troublante. Il aborde le sujet par ce qu'on appelle la vibration par sympathie, c'est-à-dire la résonance d'une corde tendue, lorsqu'une vibration sonore est produite dans son voisinage par une corde de même longueur, ou d'une longueur multiple. Le phénomène a déjà été observé, par les musiciens et les luthiers, bien entendu, mais également par Descartes dans son *Abrégé de musique* de 1618<sup>353</sup>.

Lorsque Galilée nous parle des vibrations par sympathie des cordes de la cithare ou de l'épinette, il décrit l'ensemble du processus. « Touchée, la corde vibre et continue à le faire aussi longtemps que l'on perçoit une résonance ; ces vibrations à leur tour font vibrer et trembler l'air environnant, dont les plissements, en se propageant à une grande distance, viennent heurter toutes les cordes du même instrument ainsi que celles des instruments voisins. »<sup>354</sup>. Dans cette phrase se trouvent réunies plusieurs propositions. Galilée expose le caractère durable des vibrations analogues aux oscillations du pendule que rien n'arrête, si ce n'est la résistance du milieu, puis il décrit l'énergie de ces vibrations, capables de faire vibrer l'air environnant et même les cordes situées à proximité. Enfin Galilée évoque le caractère ondulatoire de la propagation des sons, par les 'plissements' de l'air.

Galilée nous entretient des vibrations des cordes juste après nous avoir expliqué que la période des oscillations du pendule ne dépendait que de sa longueur. Ce phénomène, Galilée le relie, par analogie, au principe des chutes de deux corps, dont les durées tendent vers l'égalité et sont indépendantes des masses, ce qu'il venait justement d'exposer auparavant. Pour lui, il existe sans aucun doute une forte relation entre ces différents phénomènes. Conscient de la particularité des vibrations des cordes, qu'il aborde par la suite, Galilée cherche à expliquer le lien entre la longueur des cordes et le nombre de vibrations (analogie avec l'isochronie des oscillations du pendule), et nous amène doucement vers une relation, qu'il expose par la suite, entre ce nombre de vibrations et la hauteur de la note.

### Observer les vibrations : expériences dans un verre d'eau

La description des vibrations par sympathie des cordes de l'épinette permet à Galilée de nous exposer les conditions de son expérience suivante. « Si l'on touche vivement avec un archet une grosse corde de viole, un verre aux parois minces et polies que l'on aura posé à proximité, et dont le ton sera à l'unisson du ton de la

<sup>351</sup> Vincenzo Galilei, *Dialogo della musica antica e della moderna*, Florence, Giorgio Marescotti, 1581.

<sup>352</sup> Galilée, *Discours concernant deux sciences nouvelles*, traduction de Maurice Clavelin, Paris, A. Colin, 1970, p. 80.

<sup>353</sup> « Comme on peut voir dans les chordes de luth, dont si on en pince une, celles qui sont plus élevées qu'elle d'une octave ou d'une quinte tremblent et résonnent d'elles mesmes », René Descartes, *Abrégé de musique*, Paris, Ed Angot, 1658, p. 59.

<sup>354</sup> Galilée, *Discorsi*, *id.*, p. 80.

corde, tremblera et résonnera de façon audible. »<sup>355</sup>. Or Galilée nous explique par ailleurs comment on peut voir les vibrations sonores dans un verre rempli d'eau, et « [...] mieux encore si l'on place le verre au fond d'un récipient très large où il se trouve presque immergé : car en le faisant pareillement résonner par le frottement d'un doigt, on verra des ondes se former dans l'eau très régulièrement, puis se propager tout autour à une grande distance. »<sup>356</sup>. C'est-à-dire qu'on va pouvoir compter ces vibrations, ou du moins établir les rapports de leurs nombres en fonction des intervalles. Et c'est précisément ce que Galilée nous dit : « il m'est arrivé [...] d'observer les ondes qui se forment dans l'eau avec une parfaite régularité, puis, si le ton du verre venait à monter d'une octave, de voir aussitôt chacune de ces ondes se diviser en deux : phénomène qui prouve clairement que le rapport de un à deux est bien la forme propre de l'octave. ». Bien entendu, on pourrait objecter que tout le monde sait cela, depuis bien longtemps, le rapport de un à deux est précisément le rapport de deux cordes accordées à l'octave. Mais ce que veut expliquer Galilée, c'est que ce n'est pas le double rapport de longueur de corde qui provoque le passage à l'octave, mais bien le doublement du nombre de vibrations dans une même unité de temps.

### Mesurer la hauteur du son en comptant les vibrations

Par la voix de Sagredo, son disciple éclairé, Galilée conteste cette 'évidence' aristotélicienne. En effet, même s'il est vrai que les rapports de longueurs de cordes produisent bien des intervalles différents (octave ou quinte), il existe d'autres causes qui modifient la hauteur de la note : la tension de la corde, qui modifie la hauteur dans un rapport quadratique, et la 'grosseur' de la corde (Galilée, par la voix de Salviati corrigera cette grandeur quelques pages plus loin en invoquant le poids de la corde). Et Sagredo, après avoir correctement expliqué l'influence de ces deux paramètres sur la hauteur de la note, s'en prend alors aux anciens : « Devant ces vérités expérimentales, il n'y avait, me semblait-il, aucune raison autorisant ces savants philosophes (*sagaci filosofi*) à voir dans le rapport de deux à un, plutôt que dans celui de quatre à un, le rapport même de l'octave »<sup>357</sup>.

On sait depuis longtemps, au début du XVII<sup>ème</sup> siècle, que les intervalles d'octave sont produits par deux cordes dont les longueurs sont dans un rapport de 1 : 2, et les quintes dans un rapport de 2 : 3. Il n'existe entre ces deux phénomènes, la perception des sons et la mesure des longueurs, aucune relation physique établie. Il n'y a donc aucune solution physique à la question de ce qui provoque la sensation de hauteur de son. D'autant plus que cette loi 'magique' du rapport double des longueurs de cordes pour l'octave est contrariée par un autre mode de production des sons de hauteurs différentes, c'est la tension des cordes (ainsi que le matériau utilisé). Boèce écrivait au VI<sup>ème</sup> siècle<sup>358</sup> que Pythagore avait vérifié la proportionnalité des poids tenseurs avec la hauteur des notes, comme celle des longueurs de cordes. Il racontait à ce sujet que le philosophe, passant devant l'atelier d'un forgeron, avait été frappé par un phénomène curieux : les notes produites lorsqu'on frappe une masse avec différents marteaux sont dans un rapport d'octave lorsque les poids des marteaux sont dans un rapport double. Cette expérience, maintes fois relatée, n'avait jamais été reproduite avant que Vincenzo, le père de Galilée ne l'entreprenne. Pour la science aristotélicienne, les tensions sont proportionnelles aux hauteurs des sons, de même que les longueurs de cordes leur sont inversement proportionnelles. Il est nécessaire que cette proportionnalité se retrouve dans tous les paramètres qui déterminent la hauteur des notes, afin de préserver la perfection numérique qui prodigue l'harmonie. Mais Vincenzo Galilei est un expérimentateur. Il accroche des poids aux cordes tendues de deux monocordes, et constate que la relation n'est pas proportionnelle mais quadratique. Dès lors la théorie 'numérique' qui établit une relation entre les rapports de grandeurs et la hauteur des notes ne fonctionne plus, puisqu'il n'y a pas forcément proportionnalité<sup>359</sup>. C'est cette anomalie qui préoccupe Galilée dans les *Discorsi*, et qu'il cherche à résoudre en invoquant une autre grandeur qui détermine

<sup>355</sup> Galilée, *id.*, p. 81.

<sup>356</sup> *Ibidem*. Daniel-Pickering Walker, dans un remarquable chapitre sur les expériences de Galilée concernant la musique, soutient le point de vue que Galilée n'a pas pratiqué cette expérience. Walker dit : "It seems to me at least questionable, first, because if the vibrations of a string are too fast to be clearly seen, so will be the waves in the water." D.P. Walker, *Studies in musical science in the late Renaissance*, (London : Warburg Press, 1978), p. 28-29. Pourtant cette expérience a maintes fois été effectuée depuis, on retiendra la description et l'analyse complète qu'en fait Chladni à propos des vibrations des cloches. Chladni, *Traité d'acoustique*, trad. franc. (Paris : Courcier, 1809), p. 231-238.

<sup>357</sup> Galilée, *id.*, p. 82.

<sup>358</sup> Boèce, *De institutione musica*, Paris, Haar et Steinert, 1867, chap. I, p. 197-198. Boèce s'inspire d'un texte de Nicomaque de Gerasse du III<sup>ème</sup> siècle, *Manuel d'Harmonique*, livre II, chap. 6. Cette expérience a probablement été reconstituée, voire imaginée, par ce 'néo-pythagoricien'.

<sup>359</sup> voir C.V. Palisca, *id.*, p. 145.

la hauteur des notes, une grandeur mesurable, quoique difficilement, et qu'il attribue au nombre de vibrations du corps sonore. En reprenant une expérience de son père, à laquelle il a peut-être assisté, et dont il a sans doute lu la relation<sup>360</sup>, Galilée montre l'existence de cette grandeur mesurable qui intervient dans la propagation des sons.

### Représenter les vibrations pour pouvoir les compter

Pour donner une explication physique de la hauteur de la note, que Galilée suggère comme liée au nombre de vibrations, il faudrait pouvoir les compter. C'est ce que le savant va maintenant tenter de réaliser. Mais avant de relater ces expériences, il convient de lever un anachronisme lié à la terminologie employée dans la traduction française des *Discorsi* par Maurice Clavelin.

Le nombre de vibrations effectuées par un corps sonore lors d'une émission ne préoccupe guère les savants de ce début du XVII<sup>e</sup> siècle. Autant dire que les notions de fréquence, de période et de longueur d'onde, si familières aux physiciens contemporains, ne représentent rien et n'existent pas comme grandeurs mesurables. Dans la traduction française de Maurice Clavelin, ce passage des *Discorsi* sur les vibrations sonores est ponctué de termes modernes comme 'fréquence' ou 'période'. On comprend bien le souci du traducteur, tiraillé entre la fidélité au texte et l'élégance du style, toutefois il est inexact d'employer ces termes pour désigner une grandeur qui n'existe pas à cette époque. A la fin de son exposé sur le pendule, Galilée nous dit, à propos de la tentative de modifier la durée de ses oscillations : « [...] que l'on essaye à volonté d'augmenter ou de diminuer la fréquence de ses oscillations[...] »<sup>361</sup>, soit dans le texte original : « [...] *e tenti quanto gli piace d'accrescergli o scemargli la frequenza delle sue vibrazioni* [...] »<sup>362</sup>. Il s'agit ici de la seule occurrence du mot *frequenza* dans cet ouvrage de Galilée, et précisément à propos des oscillations du pendule, et non des vibrations sonores.

Lorsque Galilée évoque le nombre de vibrations produites par une corde vibrant par sympathie avec une autre « [...] *essendo disposta a far le sue vibrazioni sotto 'l medesimo tempo* [...] », M. Clavelin traduit par « [...] qui est prête à vibrer avec la même fréquence [...] ». Quelques lignes plus loin : « [...] *ma qualsivoglia altro corpo disposto a tremare e vibrarsi sotto quel tempo della tremante corda* [...] », traduction : « [...] mais n'importe quel corps apte à trembler et à vibrer avec la même période [...] », et encore : « [...] *secondo che verrà toccata quella corda le cui vibrazioni van sotto 'l medesimo tempo* [...] », traduction : « [...] selon que l'on touchera la corde dont les vibrations ont la même période [...] », d'autres cas suivent au long de ces pages.

### Galilée et le 'nombre de vibrations dans le même temps'

On voit bien que Galilée, même s'il emploie – une fois seulement - le terme 'fréquence' au sujet des oscillations du pendule, parce qu'il peut les dénombrer, et donc en comparer les grandeurs, se refuse à l'employer au sujet des vibrations sonores. Il utilise constamment la périphrase 'nombre de vibrations dans le même temps', ce qui représente bien une grandeur qu'il est en train d'élaborer, mais qu'il ne peut pas mesurer. Dans le passage qui suit, fondateur de la théorie des vibrations, Galilée expose clairement la relation entre le nombre de vibrations et la hauteur de la note : « Je dis que la raison première et immédiate dont dépendent les rapports des intervalles musicaux n'est ni la longueur des cordes, ni leur tension, ni leur grosseur, mais la proportion existant entre les fréquences des vibrations ( *la proporzione de i numeri delle vibrazioni* ), et donc des ondes qui, en se propageant dans l'air, viennent frapper le tympan de l'oreille en le faisant vibrer aux mêmes intervalles de temps. »<sup>363</sup>. Après avoir réfuté les règles dogmatiques sur la longueur des cordes comme cause principale de la hauteur des notes, Galilée expose cette loi fondamentale de l'acoustique musicale qui associe les rapports d'intervalles entre les notes au rapport des nombres de vibrations.

Avant d'exposer cette théorie, et pour en éprouver la validité, Galilée a besoin d'une expérience qui lui permettrait de compter le nombre de vibrations de deux sons d'un intervalle connu. Il nous propose un dispositif qui se révélera fécond quelques siècles plus tard, c'est l'enregistrement de la trace d'une vibration sonore sur un support matériel. Revenant sur l'observation des ondes provoquées par un son à la surface de l'eau, Salviati nous dit très justement : « [...] Mais comme l'eau ne les laisse voir et observer que le temps durant lequel le doigt exerce son frottement, et que même alors elles ne sont pas stables, mais se font et se défont continuellement, ne serait-ce pas une belle chose si l'on pouvait en produire, avec une grande précision, qui fussent capables de durer longtemps, je veux dire des mois et des années, offrant ainsi toute commodité pour être mesurées et comptées ? »<sup>364</sup>. Quelle prémonition!

<sup>360</sup> L'expérience est relatée dans Vincenzo Galilei, *Discorso*.id., p. 104.

<sup>361</sup> Galilée, *id.*, p. 80.

<sup>362</sup> Galileo Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, Leiden : Elzevir, 1638, p. 98.

<sup>363</sup> *id.*, p.84.

<sup>364</sup> *id.*, p.82.

## L'expérience de Galilée d'enregistrement des sons

Galilée nous raconte alors qu'un jour, en tentant de nettoyer une plaque de laiton avec un ciseau de fer, il entend un sifflement fort et clair (*un sibilo molto gagliardo e chiaro*). On comprend bien qu'il s'agit ici du grincement si désagréable à nos oreilles, provoqué par le frottement d'un outil tranchant sur une surface métallique. Galilée répète plusieurs fois l'opération, et « [...] regardant la plaque, je vis alors une longue suite de minces virgules (*virgolette*), parallèles entre elles et séparées par des intervalles rigoureusement égaux. »<sup>365</sup>. Alors Galilée va tenter de donner une crédibilité à son argumentation au moyen de cette expérience.

## Récit de l'expérience d'enregistrement des vibrations

Voici la traduction de ce passage des *Discorsi* sur la gravure des vibrations sonores<sup>366</sup> :

Elle [*l'expérience*] fut le fait du hasard ; mon seul rôle fut de noter l'observation, de l'apprécier à sa valeur, puis d'y percevoir la confirmation d'importantes spéculations, encore qu'en elle-même elle fut fort banale. Je raclais en effet avec un ciseau de fer tranchant une plaque de laiton dans le but d'enlever quelques taches, lorsqu'en déplaçant avec rapidité mon ciseau j'entendis à une ou deux reprises, entre les nombreux coups donnés, un sifflement très fort et clair ; regardant la plaque, je vis alors une longue suite de minces virgules, parallèles entre elles et séparées par des intervalles rigoureusement égaux. Passant et repassant le ciseau un grand nombre de fois, je m'aperçus que des marques apparaissaient sur la plaque seulement lorsqu'un sifflement était émis, et qu'il n'y avait pas la moindre trace de ces petites virgules quand le raclage ne s'accompagnait d'aucun bruit. Je recommençai plusieurs fois le même jeu en faisant glisser mon ciseau tantôt plus vite et tantôt moins vite : le sifflement obtenu était d'un ton parfois plus aigu et parfois plus grave ; j'observai aussi que les traces laissées à l'occasion d'un son plus aigu étaient plus serrées, et à l'occasion d'un son plus grave plus espacées ; d'autres fois encore, si le passage du ciseau avait été plus rapide à la fin qu'au début, on entendait le son devenir plus aigu, et l'on voyait les petites virgules devenir plus denses, mais toujours elles conservaient leur grande netteté et leur parfaite équidistance ; de plus, chaque fois qu'un sifflement se produisait, je sentais le fer trembler dans mes doigts en même temps qu'une sorte de frisson parcourait ma main. Ainsi le fer nous laisse-t-il voir et entendre exactement ce que nous accomplissons, pour notre part, lorsque nous parlons d'abord à voix basse puis à voix très haute : si en effet nous émettons un souffle sans former aucun son, le mouvement que nous ressentons dans la gorge et dans la bouche n'est rien comparé à la vibration intense que nous éprouvons dans le larynx et dans tout le gosier quand nous utilisons la voix, et particulièrement dans les tons graves et forts. Il m'est aussi arrivé un jour de remarquer que deux des cordes de l'épinette vibraient à l'unisson de deux des sifflements décrits plus haut, et parmi les plus différents en hauteur, puisque leur intervalle était précisément celui d'une quinte parfaite : mesurant les distances entre les stries laissées par l'un et l'autre passage du ciseau, je pus alors constater que le même espace qui contenait quarante-cinq stries dans un cas, en contenait trente dans l'autre, ce qui est exactement le rapport de la quinte.

Cette expérience, dont la relation fait l'objet d'à peine une page, est passée inaperçue pendant plus de trois siècles, tant l'ouvrage de Galilée est important sur des sujets qui passionnent davantage les historiens des sciences, en particulier l'étude du mouvement local. En 1967, Daniel-Pickering Walker<sup>367</sup> a commenté ce passage des *Discorsi*. Cette analyse a ensuite été reprise par H.-Floris Cohen<sup>368</sup>, par Patrice Bailhache<sup>369</sup>, et par l'IMSS de Florence dans ses descriptions des expériences galiléennes<sup>370</sup>. Globalement, l'analyse de Walker consiste à affirmer que l'expérience de Galilée est une '*thought experiment*', une 'expérience de pensée' telle qu'on qualifiait alors les travaux de Galilée à la suite des écrits d'Alexandre Koyré, et que le Florentin ne l'avait probablement pas effectuée<sup>371</sup>.

<sup>365</sup> Galilée, *id.*, p.83.

<sup>366</sup> *Ibidem*.

<sup>367</sup> D.-P. Walker, Galileo Galilei, *Journal of the Warburg and Courtauld Institutes*, XXX (1967) ; *Studies in musical science in the late Renaissance*, Leiden : Brill, 1978, "Galileo Galilei", 27-33. L'article a été écrit vers 1950.

<sup>368</sup> H.-F. Cohen, *Quantifying music*, Dordrecht : Reidel, 1984, p. 87-90.

<sup>369</sup> P. Bailhache, Cordes vibrantes et consonances chez Beeckman, Mersenne et Galilée, *Sciences et techniques en perspective*, Université de Nantes, XXIII, (1993), "Musique et mathématiques", p. 73-91.

<sup>370</sup> Istituto e Museo di Storia della Scienza, Florence, [www.imss.fi.it](http://www.imss.fi.it).

<sup>371</sup> D.-P. Walker défend l'idée que l'expérience n'a pas été réalisée parce qu'elle était inconcevable, et donc qu'il n'était pas possible qu'elle ait été réalisée. *Op. cit.* p 29-30. Mais si Galilée avait effectué une 'expérience de pensée', alors quelle pensée ! 250 ans avant Edison, Galilée serait donc le concepteur du phonographe sans même en avoir pratiqué l'expérience fondatrice ?

## Analyse de l'expérience des traces du son

On peut découper l'expérience en trois parties. La première établit que lorsque le ciseau frotte sur la plaque, il se produit parfois un son, et des virgules apparaissent à la surface de la plaque, seulement s'il y a un son. La seconde associe la hauteur du son avec l'espacement entre les virgules, puis la vitesse avec la hauteur du son et donc les espacements. La troisième, enfin, la plus importante, puisqu'elle doit corroborer la théorie du nombre des vibrations dans le même temps lié à la hauteur des sons, c'est l'expérience des vibrations des cordes de l'épinette par sympathie, dont le rapport de quinte provoque un rapport de 3 : 2 des distances entre virgules.

Notons que les commentateurs de ce texte ne s'attardent que sur cette troisième expérience, mais en supposant que si la hauteur du son monte, c'est que la vitesse augmente. Or Galilée ne nous dit pas cela. Il commence cette partie de l'histoire par : « Il m'est aussi arrivé un jour de remarquer que [...] » (*Ho anco tal volta tra [...]*), ce qui, malgré une élégante traduction, montre bien qu'il s'agit d'une autre observation. Et dans cette partie, Galilée ne nous parle pas de la vitesse. On la suppose variable, d'après ce qu'il nous dit auparavant, mais justement, il invoque alors la vitesse comme condition suffisante : « si le passage du ciseau avait été plus rapide à la fin qu'au début, on entendait le son devenir plus aigu [...] » (*e tal volta ancora, secondo che la strisciata medesima era fatta verso 'l fine con maggior velocità che nel principio, si sentiva il suono andarsi inacutendo, [...]*). Mais ce n'est pas une condition nécessaire, selon la phrase précédente : « Je recommençai plusieurs fois le même jeu en faisant glisser mon ciseau tantôt plus vite et tantôt moins vite : le sifflement obtenu était d'un ton parfois plus aigu et parfois plus grave » (*Replicando poi altre volte lo scherzo, strisciando ora con maggiore ed ora con minor velocità, il sibilo riusciva di tuono or più acuto ed or più grave*). Bien sûr, Galilée semble associer la variation de vitesse à la hauteur du son mais il ne l'affirme pas, ce qui laisse entendre que certaines variations de son peuvent se produire sans qu'il y ait variation de vitesse. Cette analyse pointilleuse du texte peut paraître inutile, mais une analyse physique du phénomène va nous donner un certain éclairage. Walker ne s'attarde pas sur cette expérience, relevant simplement l'erreur de Galilée sur l'impossibilité des accroissements conjoints de la vitesse, de la hauteur du son et des resserrements des virgules.

De nos jours, il nous semble que ces trois variations soient incompatibles. Du moins, c'est ce que notre 'connaissance' nous affirme, largement conditionnée par le paradigme du phonographe dont nous sommes imprégnés. En effet, sur un disque, la longueur d'onde est fixée à la gravure, donc la fréquence est liée à la vitesse. Cependant, si on appelle  $f$  la hauteur du son,  $v$  la vitesse, et  $x$  la distance entre virgules, nous avons la relation bien connue entre fréquence, longueur d'onde et vitesse de déplacement :  $x = v/f$ . Ces trois variables ne sont pas forcément liées deux par deux, et peuvent varier toutes trois dans le même sens. La reproduction de l'expérience, qu'aucun des commentateurs n'avait réalisée jusqu'alors, va nous apprendre que Galilée l'avait sans aucun doute effectuée et que, s'il s'est effectivement trompé, ce n'est pas là où Walker le pensait. La démarche ne consiste pas à vérifier la validité des propos de Galilée mais de tenter de comprendre ce qui l'amène à les tenir.

## Les intuitions de Galilée, source d'erreurs et d'innovation

Alors pourquoi ces erreurs d'observation et d'analyse ? Trois questions se posent, qui permettent d'y répondre.

Tout d'abord, il est peu probable que Galilée ait effectué cette expérience au moment de la rédaction de ce chapitre des *Discorsi*, en 1633. Agé alors de 69 ans, sa vue était sans doute déjà très affectée, il en perdra l'usage quelques années plus tard. Il est difficile de croire qu'il ait pu observer ces virgules et les compter avec autant de précision. Peut-être s'est-il fait aider, mais le plus probable est que ces expériences datent de sa période padouane, entre 1592 et 1610, lorsqu'il avait un atelier à sa disposition et encore toutes ses facultés sensorielles<sup>372</sup>. Par ailleurs, sa lettre de 1610 à Belisario Vinta où il mentionne l'ouvrage sur le son qu'il compte écrire (*De sono et voce*) est un indice de ses recherches récentes sur ce sujet. Pourquoi aurait-il envisagé la rédaction de cet ouvrage s'il n'avait pas eu quelque chose à y dire ? On peut donc penser que lorsqu'il rédige les *Discorsi*, il écrit à partir de notes de travail, encore introuvables aujourd'hui, et à partir de ses souvenirs. Cela explique la curieuse absence de données chiffrées, inhabituelle dans les *Discorsi*, notamment sur les espacements et sur la vitesse.

La deuxième question pose le problème de la relation entre hauteur d'un son et vitesse, qui représente, on l'a vu, une des erreurs de Galilée. Intuitivement, tout le monde pense que la hauteur du son dépend directement de la vitesse. Lorsque Kepler construit son système musical fondé sur le mouvement des astres, il

<sup>372</sup> D'après Raymond Fredette, s'appuyant lui-même sur la conviction de Thomas B. Settle, Galilée aurait travaillé sur le son auprès de son père, dès son retour de Pise à Florence, vers 1585 (correspondance personnelle).

associe la hauteur des notes à la vitesse de révolution des planètes. Même si les moteurs n'existaient pas à cette époque, les machines tournantes étaient légion, et on observe le même phénomène quand on scie une planche, ou quand une boule descend sur un plan incliné... Dans ce cas de figure, le son est produit par les vibrations d'un corps en mouvement au contact d'un support immobile. Sur ce corps se trouve, avant le mouvement, un relief plus ou moins régulier, les dents de scie, ou les petites aspérités présentes sur une surface tournante. Le mouvement produit des chocs à intervalles réguliers, donc une vibration. Les deux corps amplifient ensuite cette vibration pourvu que sa fréquence soit comprise dans la plage de fréquences de résonance du système, et produisent un son. Ces aspérités sont présentes avant le frottement, et alors, en effet, la fréquence est une fonction directe de la vitesse. Dans le cas d'un grincement, c'est différent. On est en présence d'un système d'oscillations forcées, constitué d'un exciteur et d'un résonateur. A la suite de perturbations, qui peuvent ne pas être permanentes, vont se produire des oscillations plus ou moins amorties, à la fréquence de résonance du système. Selon le coefficient d'amortissement, on sera en présence, pour une valeur élevée, d'un atténuateur (amortisseur, par exemple) ou pour une valeur moyenne, d'un amplificateur (caisse de résonance d'un instrument de musique). Si le coefficient d'amortissement est faible le système se comporte comme un filtre, et pour des valeurs encore plus faibles, on obtient un oscillateur, dont la fréquence se situe sur une bande étroite, autour de la fréquence de résonance du système. C'est ce qui se passe dans l'expérience de Galilée. Les aspérités ne préexistent pas au phénomène, elles en sont la conséquence : les vibrations de la plaque heurtent le couteau dans son mouvement et laissent une trace gravée (les 'virgules') à chaque alternance positive d'amplitude importante de la vibration, les espaces entre virgules correspondant aux alternances négatives. La hauteur du son est alors indépendante de la vitesse du mouvement, mais est liée à la fréquence de résonance de la plaque. Les variations de fréquence sont alors de deux sortes, soit des petites variations dans la bande de fréquence, soit des variations importantes, multiples de la fréquence fondamentale (qu'on nomme partiels plutôt qu'harmoniques dans ce cas)<sup>373</sup>.

Le troisième point concerne l'interprétation erronée de la relation entre espacement des virgules et vitesse. Encore une fois l'erreur est d'origine intuitive. Plus la vitesse est grande et plus les espaces entre virgules augmentent, si elles sont le résultat d'une action périodique et constante, on le sait. Mais reprenons le raisonnement de Galilée. Il n'établit pas de relation entre les trois grandeurs. Pour lui, le son est produit par la vitesse. La hauteur du son est fonction de la vitesse et les pulsations produites par cette vibration laissent une trace sur la plaque, il s'agit de deux phénomènes indépendants. Bien que Galilée soit en train d'élaborer une théorie ondulatoire des sons en invoquant la notion de vibration sonore, la théorie des coups reste inscrite dans son esprit. Il nous parle de pulsations qui viennent frapper le tympan de l'oreille, mais ce sont bien des coups, analogues à ceux produits par les théories corpusculaires. Quand, peu après, Galilée parle de ce qui détermine le rapport des intervalles entre notes, il dit que c'est « la proportion existant entre le nombre des vibrations, et donc des ondes qui, en se propageant dans l'air, viennent frapper le tympan de l'oreille en le faisant vibrer aux mêmes intervalles de temps. »<sup>374</sup> (*la proporzione de i numeri delle vibrazioni e percossa dell'onde dell'aria che vanno a ferire il timpano del nostro orecchio, il quale esso ancora sotto le medesime misure di tempi vien fatto tremare.*). Les termes sont vigoureux, *percossa* signifie « coup », et *ferire*, « blesser ». On comprend que pour Galilée, ces coups peuvent venir également blesser la surface d'une plaque de cuivre.

## L'expérience de Galilée comme vérification de son hypothèse

Rien d'étonnant pour Galilée à ce que, si ces coups sont plus fréquents, donc plus nombreux, ils laissent des virgules plus resserrées. Les virgules sur la plaque correspondent à la sensation perçue par le tympan lorsqu'il reçoit les coups portés par la vibration sonore. La vitesse n'intervient plus dans cette phase du processus. Nous ne sommes pas, pour Galilée, en présence d'une équation entre fréquence, vitesse et longueur d'onde, mais de deux relations indépendantes, la vitesse entraîne la hauteur du son, et la hauteur du son entraîne le nombre de virgules sur un espace.

Ce n'est pas à la suite de cette expérience que Galilée a tiré sa théorie du son dont la hauteur est fonction du nombre de vibrations dans le même temps. Il en était convaincu et ne doutait pas de sa théorie. Cette expérience lui sert d'illustration plus que de vérification, et son but est plus pédagogique que polémique. Galilée est sûr de sa théorie, parce que, pour lui, elle est dans la continuation de sa théorie du pendule et d'une façon générale de l'étude du mouvement. Un corps susceptible de vibrer (*disposto a tremare e vibrarsi*) est mis en mouvement par une excitation, comme un pendule, et finalement comme un corps pesant, et ce mouvement se continue jusqu'à son point d'équilibre. Mais ce mouvement est caractérisé par un nombre de vibrations dans le même temps, qui, lorsqu'il donne lieu à une émission sonore, est caractéristique de sa hauteur. Pour Galilée, dans le cas où le son est lui-même produit par un mouvement, c'est la vitesse qui détermine le nombre de vibrations, et donc la hauteur du son. Ensuite, cette émission sonore donne lieu à des mouvements de l'air qui

<sup>373</sup> Au sujet des vibrations des plaques, voir Chladni, *op. cit.*, p.120-141.

<sup>374</sup> Galilée, *id.*, p. 84.



atteignent leur cible, tympan de l'oreille ou plaque de cuivre, en y donnant des coups, susceptibles de laisser une trace.

Galilée a donc réellement effectué ces expériences, probablement une bonne trentaine d'années avant la rédaction des *Discorsi*. Persuadé de la justesse de sa théorie, il est avare de détails sur les résultats chiffrés et son interprétation manque sans doute de rigueur. La construction de la méthode expérimentale est une longue entreprise, et les attitudes aristotéliennes sont encore présentes : en effet, Galilée semble nous dire que son expérience vérifie son hypothèse (ou plutôt sa thèse), et l'aplomb qu'il manifeste quand il la raconte n'autorise pas la contestation.

Cependant Galilée avait vu juste lorsqu'il établissait une relation entre le nombre de vibrations et la hauteur de note, et entre ces nombres et les longueurs de corde qui déterminent les intervalles. A la même époque, Mersenne, dans son *Harmonie universelle*, détermine également que les hauteurs de notes sont proportionnelles aux « tours et retours de la corde ». Sa méthode, expérimentale, repose sur l'utilisation d'une corde très longue, faiblement tendue, en comparaison avec une autre plus courte et tendue, dont il connaît la note produite. Connaissant les rapports de longueurs (proportionnel) et de tension (quadratique), il produit une vibration suffisamment lente pour pouvoir en compter les périodes. Mersenne et Galilée ne se sont jamais rencontrés (au grand désespoir de Mersenne qui a même fait le voyage en Italie), et la correspondance de Galilée ne comprend que quatre lettres de Mersenne auxquelles Galilée n'a apparemment pas répondu. Néanmoins on peut penser que Mersenne avait lu les traités de Vincenzo, et connaissait ses expériences sur les cordes tendues. Il publiera en 1639 une traduction largement commentée des *Discorsi*, sous le nom de *Nouvelles pensées de Galilée*, dans lesquelles il relate les expériences et les thèses de Galilée sur le son. Peu après l'époque où Galilée rédigeait ce texte, en 1635, à Paris, le jeune Blaise Pascal, alors âgé de 12 ans, observait avec curiosité les sons que produisait le frottement de son couteau sur son assiette<sup>375</sup>. Avait-il entendu parler par Mersenne, qui fréquentait la maison, du texte des *Discorsi*, rédigé mais pas encore paru, on ne sait pas. Quoi qu'il en soit c'est la preuve que les esprits curieux s'intéressent à tout, même quand ils sont à la cuisine...

D'autres physiciens du XVII<sup>e</sup> siècle se pencheront, à la suite de Galilée, sur les théories des vibrations sonores. Outre Mersenne, Gassendi tentera une approche corpusculaire et sera l'inventeur du terme fréquence ( et 'infréquence', par la même occasion) pour désigner le nombre de coups dans un temps donné. Puis Huygens développera, conjointement à sa théorie ondulatoire de la lumière, une démarche semblable pour le son. Enfin, Newton sera le premier à calculer la vitesse de propagation des ondes sonores à partir d'une étude de la masse d'air en mouvement, avec toutefois une erreur importante sur les mesures réelles. Le XIX<sup>e</sup> verra le retour du procédé de gravure des vibrations sonores sur un support matériel, que Galilée avait initié, d'abord avec Thomas Young, en 1807, qui imprime la trace des vibrations d'un diapason sur un cylindre tournant, puis avec l'invention du phonautographe de Scott et Koenig en 1857 et, en 1877, celles du paléophone de Charles Cros et du phonographe d'Edison.

## L'apport de Galilée à la représentation des vibrations acoustiques

Galilée a clairement établi, sans doute le premier - mais est-ce bien important ? - que la hauteur du son dépendait uniquement du nombre de vibrations dans un temps donné, et que les autres paramètres, tels que les longueurs de cordes ou leur tension, n'étaient que des corollaires de cette loi. Cette approche qui annonce la théorie ondulatoire malgré un modèle dominant encore largement corpusculaire, est novatrice et constitue une ébauche de l'autonomie de l'étude physique des sons par rapport à la musique et au dogme de l'harmonie scolastique.

Par ailleurs, il est incontestable que Galilée est le précurseur d'une méthode de représentation des vibrations sonores, malgré les erreurs et les imperfections de ses expériences. L'idée de fixer l'image des vibrations, tellement fugitives et impalpables, pour « pouvoir les compter et les mesurer » est une manifestation de la volonté de Galilée de quantifier les phénomènes physiques, de les comparer et de leur attribuer une valeur numérique au moyen de paramètres mesurables. Il s'agit ici, encore une fois, d'une manifestation de la naissance de la physique moderne.

Et bien entendu, on ne peut passer sous silence cette prémonition, cette pirouette à l'histoire des techniques véhiculée de nos jours, qui attribue l'invention de l'enregistrement sonore à tel ou tel vers la fin des années 1870, alors que c'est bien à la fin de cette Renaissance si féconde en idées de toutes sortes, que l'on doit une de ces avancées techniques dont on a encore très peu fait l'histoire.

<sup>375</sup> Gilberte Périer (soeur de Pascal), *Vie de Pascal*, Paris : Vaton, 1845, p. 5.

## Reproduction de l'expérience 'pré-phonographique' de Galilée

L'expérience de Galilée concerne les vibrations sonores (grincements), produites par le frottement d'un ciseau de fer sur une plaque de laiton. Ces vibrations laissent une trace composée de 'virgules', plus ou moins espacées. L'expérience et le traitement des données ont été effectuées au cours de l'été 2004.

### Vérification des observations de Galilée

Galilée fait plusieurs observations :

- Lorsque le son se produit, il y a des virgules sur la plaque de laiton.
- Lorsque le frottement ne produit pas de son, il n'y a pas de virgules.
- Lorsque le son se produit, on sent une vibration dans la main.
- Ces virgules sont parallèles et les intervalles sont égaux (dans un premier temps).
- Quand la vitesse augmente, le son est plus aigu, et les espacements entre virgules diminuent.
- Quand la vitesse diminue, le son est plus grave, et les virgules sont plus espacées.
- Lorsque deux sons forment un intervalle de quinte (fréquence multipliée par  $3/2$ ), les espacements entre virgules sont dans un rapport de  $2/3$  (ou  $3/2$ , Galilée ne le précise pas, il note simplement qu'une des traces comporte 45 stries, et l'autre 30).

#### Conditions de l'expérience

Il est nécessaire de produire des grincements, et d'enregistrer les sons pour les analyser. Après divers essais (poêle et fourchette, tournevis et tôle ...), j'ai tenté de me rapprocher des conditions réelles.

La plaque est en cuivre (Galilée parle de laiton qui est un alliage de cuivre et de zinc, parfois appelée cuivre jaune). Ses dimensions sont de 13 cm x 18 cm, son épaisseur est de 1 mm. Il s'agit d'une plaque destinée à la gravure, qu'on trouve dans les commerces de loisir artisanal. Le ciseau est remplacé par un couteau de poche émoussé, de largeur d'un demi millimètre.

J'ai tracé sur la largeur de la plaque des droites équidistantes (10 mm), perpendiculaires aux traces qui seront gravées pour analyse. J'ai effectué 28 mouvements, dont plusieurs n'ont pas produit de grincement.

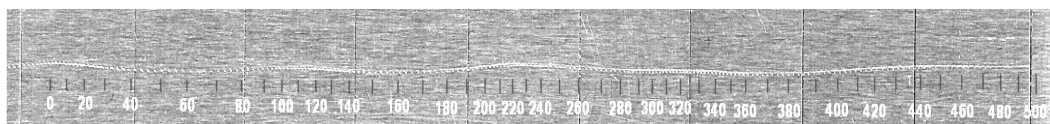
Les bruits ont été enregistrés à 20 cm par un micro Shure 515, unidirectionnel, sur l'ordinateur, par l'intermédiaire d'une carte son de type Sound Max. La fréquence d'échantillonnage est de 44100 Hz (fréquence des CD audio). La bande passante est donc de 22050 Hz.

Les enregistrements ont été découpés et sauvegardés sous forme de fichiers wav (format audio standard), avec un logiciel de montage audio (Wavelab de Steinberg). L'analyse a été effectuée avec le logiciel Spectralab (Sound Technology Inc).

Les traces laissées sur la plaque de cuivre (virgules), s'observent facilement à la loupe. La plaque, après gravure, a été scannée (400 ppp, couleur, qualité photo). Les agrandissements sont produits à partir du logiciel de traitement d'images Paint Shop Pro (JASC Software).

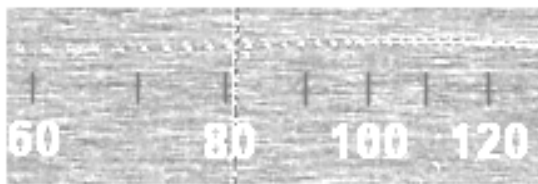
### Images des traces de son laissées sur la plaque de cuivre

Image d'une trace



Les repères verticaux correspondent aux repères temporels, en ms. Ils ont été relevés manuellement à partir des courbes suivantes (temps / amplitude) en dénombrant les virgules et les alternances positives correspondant sur le graphe du signal. Les traces verticales régulièrement espacées correspondent aux traces centimétriques gravées sur la plaque. Elles permettent, confrontées aux repères temporels, de déterminer les vitesses moyennes pour chaque intervalle de 10 ms.

Détail de la trace après agrandissement :



On voit très nettement les virgules. La trace verticale au repère 80 est une des traces centimétriques gravées préalablement sur la plaque. Avec le logiciel de traitement d'images on distingue parfaitement les pixels, et on peut les dénombrer. Lorsque la résolution est de 400ppi, un pixel est égal à 0,0635 mm. Pour éviter les effets de seuil, le dénombrement des virgules par intervalle temporel de 10 ms s'effectue par un moyennage sur un intervalle de 50 pixels centré sur l'intervalle de temps considéré.

### Analyse à l'aide du logiciel d'analyse spectrale

Le son produit par le frottement du couteau sur la plaque de cuivre a été enregistré de façon conventionnelle, au moyen d'un micro, placé à 20 cm de la plaque. Ce signal, analogique (puisque son énergie électrique varie constamment avec la variation de pression reçue par le micro), est numérisé par l'équipement audionumérique de l'ordinateur. Pour cela il est découpé en tranches à une cadence de 44100 échantillons par seconde, et une valeur d'amplitude est alors affectée à chacun de ces échantillons. L'ensemble de ces données est codé et stocké dans un fichier de type wav.

Le logiciel d'analyse spectrale qui permet la représentation graphique temps / fréquence / amplitude utilise la 'transformée de Fourier rapide' (FFT) en découpant le spectre en 'fenêtres' temporelles et fréquentielles. Une opération de moyennage est effectuée, selon différents algorithmes au choix (uniforme, triangulaire, Hamming, Hanning, Blackman, Bartlett...). La taille des fenêtres est déterminée par le nombre d'échantillons qu'elle comporte par unité de temps. Plus ce nombre est important, plus la résolution fréquentielle est grande, mais le paramètre est limité dans les basses fréquences. Les spectrogrammes présentés ont une fenêtre de 1024 échantillons, soit une résolution de 43 Hertz. Pour les mesures, une fenêtre de 4096 échantillons a été choisie, soit une résolution fréquentielle de 11 Hertz. A ce niveau de fréquence particulièrement peu élevé, la précision est difficile, et les variations de fréquence peuvent être observées de façon complémentaire sur les partiels supérieurs.

L'analyseur de spectre fournit deux graphes. Le premier est une courbe de l'amplitude en fonction du temps, c'est-à-dire le tracé des variations de la pression exercée sur l'air par la vibration de la plaque lors de l'émission d'un son. A chaque bosse de la courbe correspond une virgule de la trace. On peut ainsi faire le relevé détaillé de chaque perturbation du mouvement, mesurer les espacements, mesurer les durées, donc calculer la vitesse. Les grandes perturbations correspondent aux passages sur les marques équidistantes tracées préalablement sur la plaque à une distance de 1 cm.

Le deuxième graphe est une représentation temps / fréquence / amplitude du signal enregistré. Le temps est en abscisse, les fréquences en ordonnée, les amplitudes sont définies par des couleurs, ici en échelle de gris.

La figure 1 montre un exemple de relevé d'une trace complète d'une durée de 500 ms et ses commentaires. La figure 2 montre un intervalle d'environ 50 ms, correspondant à une portion de trace d'environ 1 cm avec ses deux graphes.

Le son principal dont l'énergie est maximale, est à la fréquence fondamentale qui se situe entre 200 et 400 Hz, donc dans la partie basse du spectrogramme (zone sombre noyée dans une zone plus claire). Les autres zones claires représentent les partiels (le terme de partiels est plus approprié qu'harmoniques, s'agissant ici de signal bruité et non périodique). Les zones verticales claires correspondent au passage du couteau sur les traces équidistantes tracées préalablement sur la plaque.

Les observations ont été relevées et compilées pour fournir trois courbes représentatives des variations de ces trois grandeurs (figure 3).

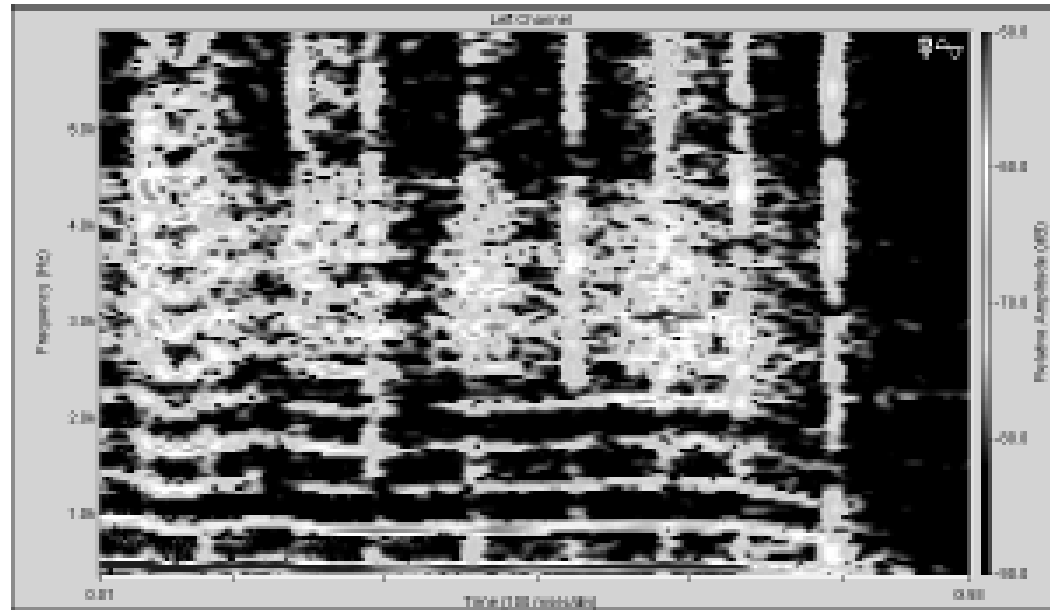
Sur les 28 traces, seule une quinzaine a produit un son, et cinq ont pu être valablement exploitées, présentant une trace régulière avec des virgules bien différenciées et un tracé suffisamment droit. Ce nombre d'expériences est suffisant pour vérifier l'ensemble des propositions formulées par Galilée. On notera que le 'saut à la quinte' s'est produit mais n'a pas pu être exploité, en revanche un 'saut à la tierce' a pu être observé.

Son 03, Trace 05.

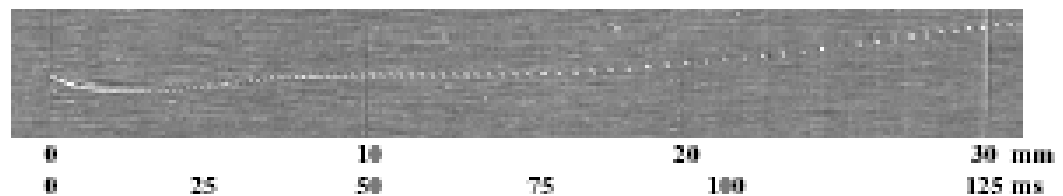
Le son est net, un peu de vibrato

Durée : 500ms

Vitesse moyenne : 120 mm/500ms, soit 0,24m/s



spectrogramme du son produit



agrandissement : de 0 à 30mm, c'est à dire de 0 à 125ms, correspond à la partie gauche du spectrogramme.

la vitesse est croissante sur l'intervalle considéré.

le son commence à 20 ms, les virgules sont régulières jusqu'à 50ms, la fréquence baisse (de 1500 à 1200 Hz pour le partiel 3).

de 50 à 70 ms, les virgules s'espacent, mais la fréquence est stable.

de 70ms à 90 ms, les virgules continuent de s'espacer, et la fréquence augmente.

de 90ms à 110 ms, les virgules sont régulièrement espacées, et la fréquence est stable.

Figure 1 : exemple de spectrogramme d'une trace avec commentaires

seg05-trace05.wav - Intervalle : 7

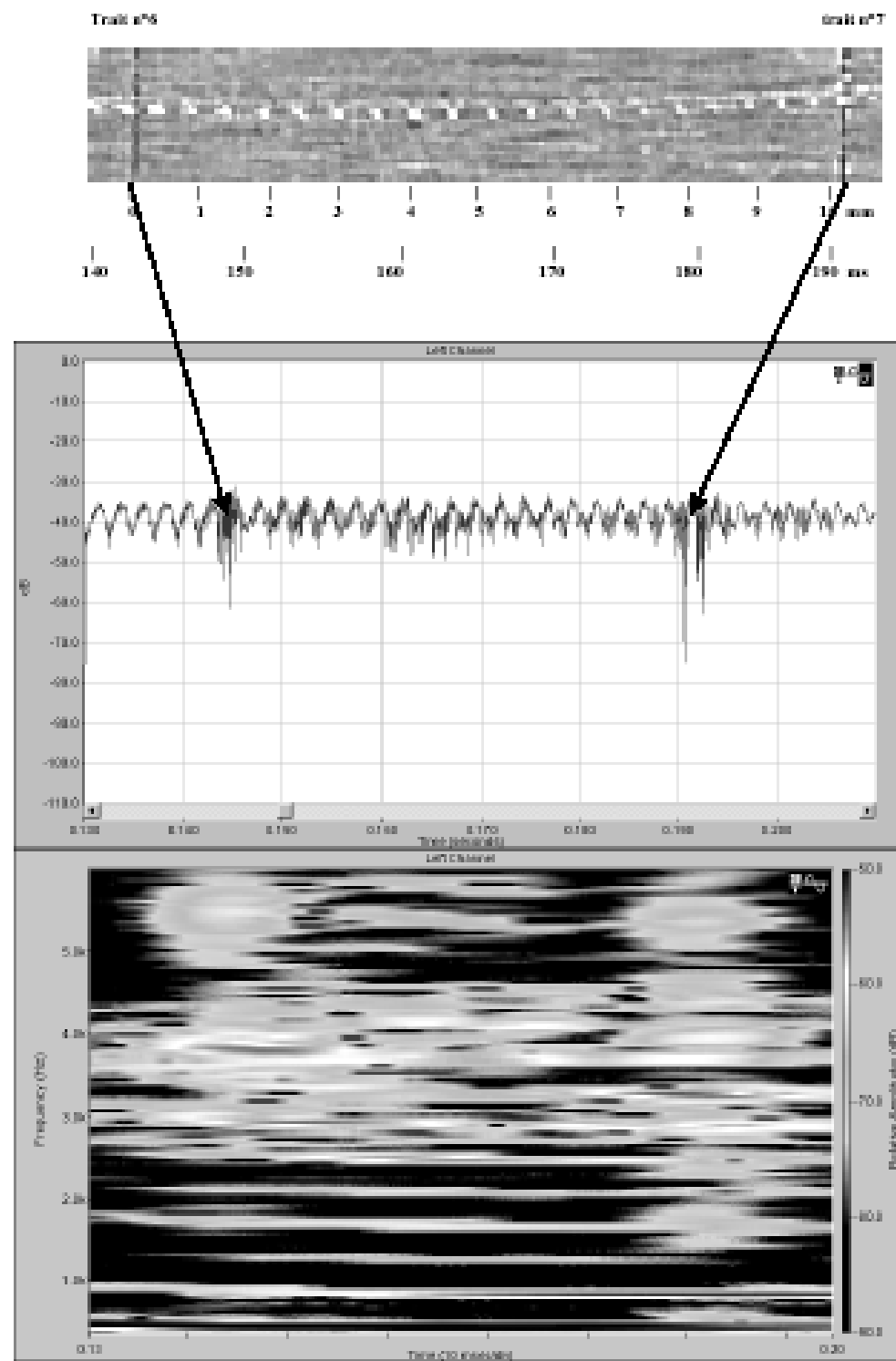
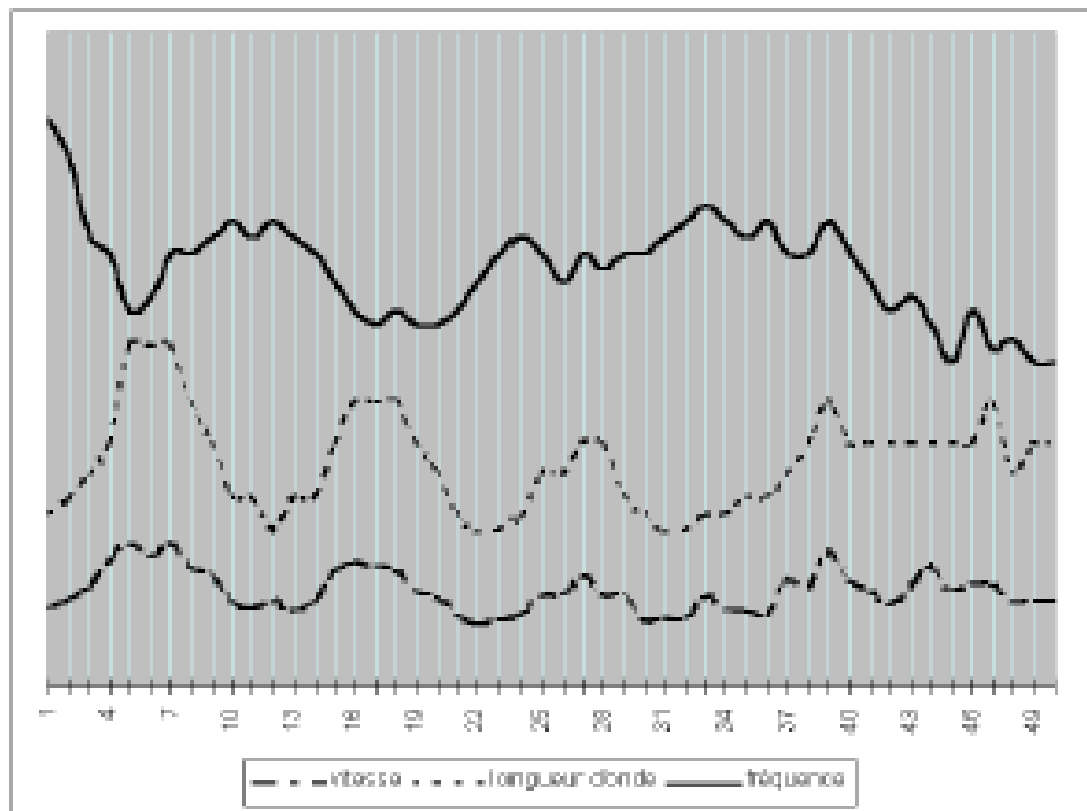


Figure 2 : exemples de relevés (environ 1 cm et 50 ms) avec les photos et les graphes temps-amplitude (en haut) et temps-fréquence-amplitude (en bas).



La trace a été découpée en 50 échantillons de 10 ms. Le graphe correspond à la trace entière, soit environ 500ms. A chaque échantillon temporel on a pu affecter une distance parcourue, donc une vitesse moyenne, une fréquence moyenne, un espacement moyen, caractéristiques de la longueur d'onde. Le moyennage des espacements a été effectué en comptant le nombre de pixels (à 400 dpi, un pixel est un carré de 0,0635mm), à chaque fois sur un intervalle de 50 pixels autour de l'espace considéré. Les vitesses ont été calculées à partir des distances ainsi mesurées et des intervalles de temps de 10 ms. Les mesures de fréquences ont été prises sur le logiciel analyseur de spectre, avec une résolution de 10 Hz.

La relation fondamentale,  $\lambda = v/f$ , vérifiée par  $\lambda f/v = 1$ , est calculée pour chaque échantillon. L'erreur moyenne est de 0,42%, ce qui confirme la validité des observations.

Pour une meilleure lisibilité, la courbe des fréquences a été fortement expansée, car les variations sont faibles, quoique tout à fait perceptibles à l'oreille (une variation de 12 % représente un ton). Cependant ces fréquences sont toutes comprises dans une bande étroite entre 390 et 470 Hz autour de la fréquence moyenne de 424 Hz, soit environ 10 % d'excursion. Nous ne sommes pas ici en présence de saut de fréquence.

**Figure 3 :** Exemple de courbes des variations des trois grandeurs mesurées : vitesse, longueur d'onde et fréquence.

## Analyse des courbes obtenues

La première observation est que globalement la courbe des longueurs d'onde suit la courbe des vitesses. La relation entre ces grandeurs n'est toutefois pas rigoureusement proportionnelle, elle dépend également de la fréquence.

La relation entre la fréquence et la longueur d'onde est presque toujours cohérente, en inversion de phase, avec parfois un léger retard de la fréquence.

De même, la vitesse et la fréquence semblent s'opposer dans leurs variations, ce qui contredit les observations de Galilée.

Malgré tout, il est possible de trouver au moins un passage au cours duquel la fréquence, la vitesse croissent alors que la longueur d'onde décroît, ce que Galilée semble décrire.

Il semble bien que toutes les combinaisons soient possibles entre les trois grandeurs, la seule constante étant la valeur unitaire du rapport  $\lambda * f / c$ .

La variation de fréquence semble être 'parasite' dans la relation. Cette variation semble très faible, de l'ordre de 12% entre valeurs extrêmes. Cependant elle est suffisamment importante pour être perçue par une oreille musicienne. En effet, une variation de 6% de la fréquence correspond à un demi ton ( le rapport de fréquence pour un intervalle de demi ton est exactement de 1,059). C'est sans doute cette variation, très nettement audible, mais finalement très faible, de la fréquence qui a induit Galilée en erreur.

Contrairement à la production de sons dont la fréquence résulte de grandeurs déterminées (longueur de corde, tension, masse), nous sommes ici dans une configuration de bruit blanc filtré, c'est-à-dire d'un mélange de toutes les fréquences, dont on prélève une bande étroite. On voit très nettement sur les spectrogrammes la présence de bandes relativement larges de fréquences. Le son produit est issu d'une des fréquences contenues dans cette bande. Les faibles variations de fréquence à l'intérieur de cette bande sont dues à des paramètres incontrôlés du frottement (pression, adhérence, angle d'incidence).

Par ailleurs, Galilée pense sans doute, intuitivement, que les virgules doivent se resserrer lorsque le son monte. Car pour lui l'impression de ces virgules est une conséquence de la production d'un son, et doit donc suivre cette loi, resserrement des virgules puisque augmentation du nombre d'événements par unité de temps. C'est bien entendu compter sans la vitesse, et encore une fois, la variation de fréquence n'est pas suffisante pour 'rattraper' celle de la vitesse.

## Analyse des changements de fréquence brusques à la quinte

Galilée nous dit que parfois le son fait un saut et fait résonner la quinte sur les cordes de l'épinette voisine. Nous avons vu sur le spectrogramme que de nombreux partiels sont produits en même temps que le son principal, c'est-à-dire que nous obtenons l'énergie la plus grande sur le fondamental, et un grand nombre de niveaux d'énergie moindre aux fréquences multiples. Ces partiels correspondent aux octaves lorsqu'ils sont de rang pair, et aux intervalles de quinte pour le rang 3 et de tierce pour le rang 5. Il arrive que le niveau d'énergie principal passe brusquement du fondamental à un partiel de rang supérieur. Les expériences de Chladni sur les vibrations des plaques<sup>376</sup> montrent que de tels sauts se produisent.

Dans la reproduction de l'expérience, si des 'sauts à la quinte' se sont bien produits, ils n'ont pas présenté une trace exploitable, mais en revanche des 'sauts à la tierce' ont été observés et analysés.

Pour faire résonner les cordes d'une épinette placée à proximité, il n'est pas nécessaire que l'intervalle soit parfaitement accordé et qu'il présente une quinte juste. En effet, le son produit n'a pas une fréquence pure, mais correspond à une bande de fréquence autour de la fréquence principale, comme il a été décrit plus haut. Il est tout à fait plausible qu'une telle résonance ait eu lieu lors de l'expérience de Galilée.

## Conclusions de la reproduction de l'expérience

Lorsqu'il y a un son, il y a des virgules, et inversement. L'espacement de ces virgules est régulier et variable, ils sont mesurables. Il existe une relation entre les espacements, les vitesses et les fréquences des sons, même si on ne peut établir ici une loi générale, ce qui n'était pas le but de la reproduction de cette expérience. Le passage à la quinte (partiel 3) est plausible, il a été constaté et mesuré pour la tierce (partiel 5).

<sup>376</sup> Chladni, *Traité d'acoustique*, trad. française, Paris, 1809, p 231-238. Il s'agit d'observations méthodiques des figures formées par du sable fin sur une plaque en vibration.

Galilée a effectué l'expérience. Il en a tiré une méthode de mesure durable des longueurs d'onde, c'est-à-dire des fréquences si les conditions sont maîtrisées. L'interprétation des résultats est erronée, mais ce n'est pas essentiel. Le défaut de fiabilité du procédé réside dans l'irrégularité et dans l'absence de contrôle du processus, mais Galilée a bien produit les bases de la représentation graphique des sons.



## 5 - Le son est corpuscule

La théorie corpusculaire du son est élaborée et défendue par les atomistes de l'Antiquité, on cite généralement Démocrite, Epicure et Lucrèce. Appliquée aux sensations, cette théorie est développée pour le goût et l'odorat, et surtout pour la vue avec le recours aux célèbres 'simulacres' (*eidola*). Cette théorie subit les attaques des Aristotéliens, des Stoïciens puis de l'Eglise. On sait que peu d'écrits d'auteurs proches de l'atomisme ont échappé aux désordres des premiers siècles. Cependant la modélisation du son par *un flux, ou un écoulement de petits fragments figurés d'une même façon* est assez répandue, pas toujours de façon explicite, chez de nombreux savants du XVII<sup>ème</sup> siècle qui n'affichent pourtant pas forcément leur penchant atomiste. En effet, on trouve chez plusieurs auteurs de l'époque moderne, notamment chez Galilée, des allusions à l'aspect percussif de la propagation des sons, toutefois sans référence explicite au modèle corpusculaire.

Cette théorie des 'grains de son' réapparaît donc au cours de la première moitié du siècle avec Beeckman et avec Gassendi qui la développe en précisant les propriétés de hauteur de son et d'intensité dans le cadre de l'hypothèse corpusculaire. Cependant la théorie ne résistera pas aux expériences et aux observations pratiquées par de nombreux savants de cette époque. La théorie corpusculaire, grâce à son approche mécanique, permet de résoudre plusieurs des questions liées à la propagation des sons décrite ici comme un transport de corpuscules émis par le corps sonore et se dispersant dans l'air avant d'être perçus par l'organe de l'ouïe. En effet, cette modélisation convient très bien aux propriétés de réflexion sur les parois, observables lors d'échos, qu'elle assimile à un rebond, ainsi qu'à la prise en compte du temps de propagation du son puisqu'il y a mouvement de matière. Elle est compatible avec la notion de 'timbre' alors caractérisé par une 'figure' particulière de ces corpuscules, spécifique à chaque 'couleur' de son. Le traducteur et commentateur de Gassendi, François Bernier expose ainsi dans la première édition de son *Abrégé de la philosophie de Gassendi*<sup>377</sup> :

[...] ce mouvement du son nous doit encore être une preuve que le son est quelque chose de corporel ; puisqu'il a tant de rapport avec les corps, je veux dire que non seulement il est transmis d'un lieu à un autre, et réfléchi, mais qu'il avance même et retourne assez lentement, comme nous dirons lorsque nous rechercherons la cause de ce que le tonnerre est entendu plus tard que n'est vue la foudre.

[...] le son n'est autre chose que de petits tas ou fragments formés et figurés d'une même manière.

Tout est dit, la matérialité du son, son transport, la réflexion 'mécanique', le temps de propagation expliquant le décalage entre éclair et tonnerre. Le son est constitué d'agglomérations de corpuscules dont la forme détermine le timbre. Il y a ici matière à polémique avec les Aristotéliens, à la fois sur la nature matérielle du son, sur la continuité du milieu de propagation (l'air), sur le mouvement local et sur la durée de propagation.

En revanche la théorie corpusculaire explique mal la superposition, puisque elle suppose que les chocs entre corpuscules seraient sans conséquence sur leur trajectoire, ce qui est incompatible avec la réalité observée des chocs entre deux corps en mouvement. Une autre objection sans réponse est contenue dans le principe même de cette modélisation : s'il y a émission de corpuscules et transport de matière, alors le corps sonore devrait subir une altération, et ces corpuscules devraient s'accumuler quelque part... Si Lucrèce évoque le sujet, cette objection, rarement soulevée, n'est jamais résolue<sup>378</sup> :

[...] La voix souvent blesse la gorge et les cris irritent les canaux qu'ils parcourent. [...]

[...] Il est donc impossible de douter que la voix et les paroles ne soient faites d'éléments corporels, puisqu'elles sont capables de blesser.

Tu n'ignores pas d'ailleurs quelles forces nous perdons et à quel point nos nerfs défont, lorsqu'il a fallu soutenir une conversation depuis la brillante naissance de l'aurore jusqu'aux ombres de la nuit noire, surtout si l'on s'est répandu en éclats de voix.

La voix est donc nécessairement de nature corporelle, puisque parler beaucoup nous cause une perte de substance.

<sup>1</sup> François Bernier, *Abrégé de la philosophie de Gassendi*, 1<sup>ère</sup> éd., Langlois, Paris, 1674, p 371-372.

<sup>2</sup> Lucrèce, *De rerum natura*, Traduction Henri Clouard, Garnier, Paris, 1964, IV, 530-540.

Parler beaucoup cause donc une perte de substance... Il est manifeste que cette hypothèse n'a pas été vérifiée, ni par observation, ni par expérience.

Gassendi reprend cette approche, et cite Lucrèce, mais n'apporte pas d'explication sur la perte et l'accumulation de matière sonore.

On pourrait aisément reconnaître les adeptes de la théorie corpusculaire à leur approche du phénomène de l'écho. Là où les Aristotéliens se contentent de décrire des anecdotes rapportés, les atomistes tentent une représentation du phénomène selon le modèle mécanique. On conçoit en effet la difficulté d'expliquer l'écho en niant le temps de propagation et en invoquant l'immatérialité du son qui n'existe que si une oreille est présente pour l'entendre, malgré les comparaisons, voire les analogies, avec les balles rebondissantes d'Aristote ou les ronds dans l'eau de Thomas d'Aquin.

La réapparition des textes anciens favorisée par la Renaissance permet aux physiciens de cette première moitié du XVII<sup>e</sup> siècle de lire les textes fondateurs de l'atomisme soigneusement écartés jusqu'alors. Il s'agit du *De Natura* de Lucrèce et des trois *Lettres* d'Épicure transmises par Diogène Laërce. Les principaux savants qui s'emparent de cette nouvelle représentation de la matière sont Isaac Beeckman, Pierre Gassendi, Sébastien Basson, puis plus tard, Guillaume Lamy, Walter Charleton et plusieurs savants italiens autour de ce qu'on appelle le 'Cercle Pisan'. Le corpuscularisme des siècles suivants ne s'inspire plus guère de l'atomisme antique et sa théorie, notamment celle que Newton applique à la lumière, est d'une tout autre nature.

## Isaac Beeckman

Redécouvert au début du XX<sup>e</sup> siècle par la publication de son *Journal*, seule œuvre qui nous soit parvenue, Isaac Beeckman est un acteur important de cet atomisme renaissant. Il est l'élève de Simon Stevin, puis enseigne à l'Université de Leyde ainsi qu'à Dordrecht. Il est le correspondant de Mersenne, de Descartes et de Gassendi. Son maître, Stevin, écrit un texte sur l'harmonie et la division de l'octave, dont nous connaissons quelques extraits dans lesquels on ne trouve rien sur la propagation et la nature physique du son. En revanche, Isaac Beeckman aborde à plusieurs reprises la nature matérielle du son qu'il cherche à établir contre l'idée dominante des Scolastiques qui définissent le son comme une 'qualité'.

Dès 1614, il pose<sup>379</sup> :

Sic dubitabit aliquis num materia soni ex re sonora vel audita prodeat.

[On hésitera sur la question de savoir si la matière du son procède de la chose sonore ou bien de l'audition]

Beeckman s'oppose ici frontalement à la théorie aristotélienne modifiée par les Scolastiques de la 'qualité successive' spéculant la propagation du son selon une représentation plutôt confuse. Pour Beeckman, le son est matériel, comme d'ailleurs la lumière, les odeurs et les saveurs, et cette matérialité n'est pas compatible avec l'existence du son exclusivement lorsqu'il est perçu, comme le disent les aristotéliens. Pour Beeckman, comme pour Mersenne, le son existe même s'il n'y a pas d'oreille pour l'entendre, ce n'est donc pas une 'qualité', mais un mouvement matériel, et cette matérialité trouve son origine dans le corps sonore.

Dans une note manuscrite annexée à sa thèse de médecine soutenue à Caen en 1618, connue aujourd'hui encore de façon fragmentaire, Beeckman aborde la physique des sons en ces termes<sup>380</sup> :

Soni materia quae aures ingreditur auditum motura est ille idem numero aer, qui erat in ore loquentis

[La matière du son, qui entre dans les oreilles à l'audition sera mue [en étant] cette même quantité d'air qui était dans la bouche du locuteur.]

*Soni materia, quae aures ingreditur auditum motura  
est ille idem numero aer, qui erat in ore loquentis.*

Beeckman reprend à plusieurs reprises cette affirmation dans ses écrits, en insistant sur le caractère matériel de l'émission sonore. Cette phrase, qui introduit la théorie de Beeckman sur la nature corpusculaire du son, a été analysée et confrontée à l'interprétation approximative qu'en fait Descartes par Frédéric de Buzon<sup>381</sup> :

<sup>379</sup> Isaac Beeckman, *Correspondance*, Ed. C. de Waard, M. Nijhoff, La Haye, 1939, t 1, Juillet 1613-Avril 1614, p. 28.

<sup>380</sup> Isaac Beeckman, *Correspondance*, Ed. C. de Waard, M. Nijhoff, La Haye, 1953, t 4, 6 Septembre 1618, p. 44.

[...] historiquement, la première traduction de cette proposition fut donnée par Descartes : « la même partie d'air, *in individuo*, qui sort de la bouche de celui qui parle, va frapper toutes les oreilles » (62). Cette traduction est-elle fautive ? C. de Waard (63) le laisse entendre, en indiquant que Beeckman, dans ses notes et dans sa lettre du 1er octobre 1629 à Mersenne, ne parle pas de parties d'air, mais veut dire au contraire que « la "quantité d'air" qui allait jusqu'à l'auditeur était égale à la quantité qui se trouvait dans la bouche de celui qui parlait ». Il ne semble pas cependant que cette interprétation soit exacte. Les contemporains, Descartes (64) ou Gassendi, ont compris la similitude de cette théorie avec celle d'Epicure ; Mersenne va plus loin encore, qui discute des arguments mêmes du *Journal* en faveur de la thèse, identifiée à un atomisme (65). De plus, l'identité *numero* ne relève pas ici de l'analyse quantitative et de l'égalité, mais de la logique : l'air sortant de la bouche de celui qui parle, etc., n'est pas spécifiquement le même, mais numériquement le même : à l'identité spécifique, qui serait une banalité, Beeckman oppose, et c'est là l'originalité de sa thèse, une identité individuelle de la particule d'air émise par la source sonore ; et cette interprétation est confirmée par les nombreux textes qui évoquent explicitement les *particulae aeris* (66).

(62) Descartes à Mersenne, de la mi-janvier 1630, AT, I, p. 109 ; CM, II, p.371.

(63) CM, II, p. 379.

(64) La philosophie cartésienne ne fournissant pas de principe d'individuation intrinsèque des objets matériels (cf. G. Rodis-Lewis, *L'individualité selon Descartes*, Paris, 1950, p. 59), la critique de Beeckman est corrélativement peu fondée.

(65) P. ex., *Harmonie universelle*, Livre Premier, de la nature et des propriétés du son, t. I (ed. CNRS) p. 34, proposition 20 : « Les sons s'empêchent et se nuisent les uns aux autres quand ils au rencontrent. ».

(66) P. ex., I, p. 252, 305-306, 319, etc.

On est ici au cœur de la problématique atomiste de la propagation du son. Selon Frédéric de Buzon, il ne s'agit pas, comme chez Straton-Aristote, d'un mouvement de parties d'air qui se succèdent les unes aux autres, mais bien du mouvement d'une même partie d'air sur toute l'étendue de la propagation. En 1616, Beeckman développe plus longuement sa théorie en rejetant d'une part l'analogie des 'ronds dans l'eau', et d'autre part la modélisation présentée dans le *De audibilibus* de Straton-Aristote. Voici le texte de Beeckman<sup>382</sup> :

Sonus est idem numero aer qui fuit in ore loquentis.

Scripsi alias materiam sonorum esse aerem, at quaeri potest, qua ratione. Nam si similitudo, quam quidam proferunt, vera est, sumpta ab aquâ, in quam lapis projectus est, quae motâ circulis parallelis, cujus centrum punctus incidentiae lapidis est, tremendo undique se spargit, — si inquam, talibus quoque circulis aer impulsus ad aures nostras pervenit, et ibi sonitum excitat, mirum videbitur cur ventus, qui multo fortior est afficiendo corpus, sonum quoque non excitet, aut cur sonus, id est aer motus, solas aures non autem ut ventus cutem etiam afficit, et cur eodem tempore voces venientes ab Occasu in Orientem et ab Austro in Septentrionem etc. audiuntur, neque ullo modo, aut parum saltem, se mutuo impediunt, cum ventus a duobus locis aut plagis oppositis simul non spiret.

Dico igitur, cum corpus durum percutitur aerque intercipitur, aut aer, quovis modo quo sonus fit, movetur, primum aerem quem percussio immediate movet, non protrudere aerem proximum eodemque modo movere atque ipse motus erat, atque hunc iterum sibi proximum impellere dum successione aures impingantur, ut in aqua fieri diximus, sed illum ipsum aerem, qui tangitur immediate et afficitur, a re dura violenter discuti, disjici et partite se undique diffundere, ita ut ipse aer impulsus aures nostras feriat, eo modo quo flamma candelae se spargit per totam aulam et vocatur lux.

[Le son est l'air en même quantité]<sup>383</sup>

J'ai écrit ailleurs que l'air est la matière du son, et on peut en chercher la raison. En effet, si la comparaison que certains affirment est exacte, selon laquelle le mouvement circulaire et parallèle pris par l'eau dans laquelle on a jeté une pierre, avec pour centre le point d'incidence de la pierre, se répand de tous côtés par tremblement, — si, dis-je, l'air ébranlé parvient aussi à nos oreilles par de tels cercles, et nous donne la sensation de son, il est étonnant de voir pourquoi le vent, qui est un corps beaucoup plus puissant ne nous donne pas la sensation de son, et pourquoi le son, mouvement d'air, n'affecte que les seules oreilles et pas la peau, comme le vent, et pourquoi les

<sup>381</sup> Frédéric de Buzon, « Sciences de la nature et théorie musicale chez Isaac Beeckman », in *Revue d'Histoire des Sciences*, 38-2, 1985, p. 97-120, ici p. 116.

<sup>382</sup> Isaac Beeckman, *Correspondance*, Ed. C. de Waard, M. Nijhoff, La Haye, 1939, t 1, Février-Décembre 1616, p. 92-93.

<sup>383</sup> On pourrait également interpréter par : [Le son est de la même quantité de particules d'air que celle qui est émise de la bouche de celui qui parle.], si on tient compte des positions atomistes de Beeckman.

voix venant de l'occident vers l'orient et du sud vers le nord, sont entendues dans le même temps, ni de quelle façon ils se gênent mutuellement, même si c'est faiblement, alors que le vent ne souffle pas simultanément de deux lieux ou régions opposées.

Je dis donc que le premier air que la percussion met immédiatement en mouvement, lorsqu'un corps dur est percuté et lorsque l'air est divisé ou bien lorsqu'il est mis en mouvement par n'importe quel moyen que le son produit, cet air ne chasse pas l'air le plus proche, se mouvant par le même moyen que le mouvement lui-même, et ébranlant à nouveau celui qui lui est le plus proche jusqu'à ce que les oreilles soient frappées de proche en proche, comme j'ai dit qu'il se faisait dans l'eau, mais que cet air là lui-même est immédiatement touché et disposé à être fendu par un corps dur, à être séparé et à s'étendre de tous côtés par parties, de façon à ce que l'air ébranlé lui-même frappe nos oreilles, de la même façon que se répand dans toute la cour la flamme de la chandelle qu'on nomme lumière.]

Le premier paragraphe concerne la révocation de l'analogie des 'ronds dans l'eau' en raison de son incompatibilité avec les mouvements du vent.

La seconde partie est constituée d'une phrase longue et confuse, mais on retient que selon Beeckman, la propagation du son ne s'effectue pas de proche en proche, par des chocs successifs de parties d'air qui s'éliminent tour à tour, mais par un ébranlement initial qui propage la partie d'air contiguë au corps sonore jusqu'à l'oreille, après avoir été divisée en plus petites parties.

Finalement Beeckman se rapproche d'Aristote en rejetant les théories scolastiques puisqu'il admet une certaine continuité du flux sonore. A ceci près que celui-ci est constitué de parties d'air qu'il décrira plus loin comme matérielles et composées elles-mêmes de particules. Ces particules d'air, des *homogenea*, sont des 'assemblages d'atomes' de matière (le terme 'molécule' est introduit plus tard par Gassendi). Ce que Henk Kubbinga résume ainsi<sup>384</sup> :

D'après Beeckman, tout phénomène physique sera donc foncièrement discret, la lumière et le son pas moins que la force attractive de la terre ou les matériaux physico-chimiques ou biologiques.

[...] Ainsi, émettre un son revient alors au rayonnement d'*homogenea* : une source sonore est mise en parallèle avec une chandelle qui brûle tout en émettant une lumière moléculaire, faite des *homogenea* de suif. Dans le cas du son, ce sont les *homogenea* de l'air qui sont brisés par la source, disons la corde d'un violon, puis éparpillés sur l'auditoire. Toute source, tout instrument musical, produit son propre genre d'*homogenea* et Beeckman s'épuise à réduire les différentes qualités du son à des différences dans la composition des *homogenea* concernés.

La théorie corpusculaire de Beeckman est finalement très éloignée de celle de Lucrèce et de celle d'Epicure. Beeckman avait reçu une formation 'technique' auprès de Stevin, et il connaissait Archimède et Héron. Il avait par ailleurs effectué de nombreuses expériences de pneumatique et son approche de la constitution de l'air était certainement influencée par ces connaissances empiriques. D'autre part, il avait également reçu de Stevin une solide formation théorique en musique et la pratique des instruments à cordes lui a permis de compléter sa théorie corpusculaire de la propagation des sons par une théorie des cordes vibrantes qui pour la première fois associait la 'fréquence' à la longueur de la corde<sup>385</sup>. Beeckman est l'initiateur de ce nouveau courant atomiste et matérialiste qui se transmettra à Gassendi à l'occasion de la visite que celui-ci lui fit en 1629.

### **Gassendi : la réhabilitation de l'atomisme d'Epicure**

Le représentant incontesté de l'atomisme 'militant' au XVII<sup>e</sup> est Pierre Gassendi. Le contexte n'était pas défavorable au développement de ses thèses, depuis que la condamnation de l'héliocentrisme par l'Eglise avait éclipsé celle de l'atomisme matérialiste. Par ailleurs, vers 1640, la physique aristotélicienne apparaissait, auprès des savants, de plus en plus inadaptée aux connaissances qu'on avait de la nature. Gassendi publie en 1624 un opuscule anti-aristotélicien<sup>386</sup>, mais respectueux de la Foi chrétienne, et cette publication lui amène à la fois la célébrité et quelques ennuis avec les Scolastiques encore bien influents au sein de l'Eglise. Pourtant

<sup>384</sup> Henk Kubbinga, *L'histoire du concept de molécule*, 3 tomes, Paris, Springer-Verlag France, 2002, Tome I, Chapitre 6, p. 224-225

<sup>385</sup> Voir à ce sujet l'article de Patrice Bailhache : « Isaac Beeckman a-t-il démontré la loi des cordes vibrantes etc. » in *Revue d'Histoire des Sciences*, Paris, 1992, t 45/2-3, p. 337-344.

<sup>386</sup> Pierre Gassendi, *Exercitationes adversus Aristoteleos*, Grenoble, 1624.

Gassendi est révérencieux dans sa condamnation chrétienne d'Aristote. C'est ainsi qu'à la fin de sa préface, il fait cette déclaration<sup>387</sup> :

Je ne demande qu'une chose : si quelqu'un trouve trop libres quelques-uns des titres que je donne à mes chapitres, qu'il examine avec attention de quelle manière je m'explique. Il verra que je défends, en toute occasion, la vérité, l'autorité, la majesté de la Sainte Ecriture, des Pères et des Conciles.

Si Gassendi développe des thèses issues d'Epicure et de Lucrèce, c'est conjointement à ses observations (surtout astronomiques) et à ses expériences qui l'amènent peu à peu à une théorie de la matière composée de corpuscules et de vide. On sait qu'il s'oppose à Descartes sur ce dernier point, l'existence du vide. Cependant, il tente une synthèse entre son matérialisme et l'idée d'un Dieu créateur et d'une âme immortelle, favorisant ainsi l'acceptation de son système par l'Eglise.

C'est sans doute à la suite de sa rencontre avec Beeckman, en 1629, que Gassendi décide d'entreprendre des recherches sur Epicure et de tenter sa réhabilitation. Gassendi entrevoyait la richesse épistémologique du concept d'atome, mais il fallait, dans cette démarche, s'opposer frontalement à l'opinion courante qui faisait d'Epicure un matérialiste convaincu de débauche. Il y avait certainement également chez Gassendi une sorte de défi, faire d'Epicure un équivalent de l'Aristote des Scolastiques, qui serait l'inspirateur de la nouvelle philosophie en gestation. Après tout, architecte malgré lui de la science chrétienne, Aristote était païen et nombre de ses thèses ont été rejetées par l'Eglise... C'est ainsi que lorsque Gassendi, devenu célèbre, publie en 1647 une Vie et mœurs d'Epicure, il plaide<sup>388</sup> :

Que dira-t-on si je viens à bout de démontrer que de tous les philosophes, il a été celui dont la vie a été la plus irréprochable, la plus chaste et la plus sévère ; dont l'esprit a été le plus clair et le jugement le plus solide ? [...]

Pour ce qui regarde ses dogmes, je ne nierai pas qu'il en avance d'opposés et de contraires à notre religion ; il n'est aucun philosophe exempt de ce reproche, pas même Aristote. Cependant cela n'empêche pas qu'on suive leur philosophie. Dès le moment que je trouve quelqu'une de ses opinions contraire à la foi, je la rejette et la combats de toutes mes forces, et quoique je fasse son apologie et que j'explique sa doctrine, je n'adopte pas ses écarts.

Le désir d'inventer une nouvelle philosophie s'accompagne, chez Gassendi, du souci de la rendre crédible, donc acceptée par l'Eglise, et le système atomiste des Anciens présente l'avantage de proposer un archaïsme, Démocrite, et deux référents, l'un grec, Epicure, et l'autre romain, Lucrèce. Par ailleurs, le corpus étant limité et encore peu décrypté, l'exégèse et le commentaire se présentent favorablement.

## La physique des sons de Gassendi

La représentation de la propagation des sons de Gassendi est délibérément corpusculaire. La première fois que Gassendi aborde la propagation des sons, c'est dans une lettre à Fortunio Licetti d'août 1640<sup>389</sup>. Dans le cadre d'une longue étude sur la grandeur apparente du soleil, Gassendi expose sa théorie de la lumière. Il entreprend alors la désormais classique comparaison entre le son et la lumière, et expose à cette occasion ses premières hypothèses sur le son, synthèse de ses lectures et de ses rencontres avec Beeckman et Mersenne.

Puis Gassendi développe la théorie corpusculaire du son dans un vaste ouvrage théorique destiné à établir les fondements de l'atomisme moderne à partir des textes d'Epicure recueillis par Diogène Laërce, les *Animadversiones*<sup>390</sup>, et ensuite dans la section III de sa *Physica* incorporée dans l'œuvre principale de Gassendi, le *Syntagma* qui occupe les deux premiers tomes de ses œuvres complètes parues, après sa mort, en 1658<sup>391</sup>.

La lettre à Licetti aborde la propagation du son par l'analogie avec celle de la lumière. L'extrait de la section III de la *Physique* est consacré à la physiologie de l'audition. Seul le chapitre des *Animadversiones* est entièrement consacré à la physique des sons, il est repris intégralement avec peu de modifications dans la section I de la *Physica*<sup>392</sup>.

<sup>387</sup> Pierre Gassendi, *id.*, traduction A. Martin in *Histoire de la vie et des écrits de Gassendi*, Paris, Ladrangé, 1853, p. 53.

<sup>388</sup> Pierre Gassendi, *De vita et moribus Epicuri*, Paris, 1647, trad. A. Martin, *id.* p. 123.

<sup>389</sup> Pierre Gassendi, *Epistolae quatuor de apparente magnitudine solis humilis et sublimis*, lettre II à Fortunio Licetti, août 1640, in *Opera omnia*, tome 3, Anisson, Lyon, 1658, p. 444-445.

<sup>390</sup> Pierre Gassendi, *Animadversiones in decimum librum Diogenii Laertii*, Lyon, Anisson, 1649, t 1, p.272-287.

<sup>391</sup> Pierre Gassendi, *Opera omnia*, tome 2, *Physica* sectio III, liber VII, De sensibus speciatim, cap. IV, *De auditu et auditione*, L. Anisson, Lyon, 1658, p. 361-369.

<sup>392</sup> Pierre Gassendi, *Opera omnia*, tome 1, *Physica* sectio I, liber VI : De qualitatibus rerum, cap. X, *De sono*, L. Anisson, Lyon, 1658, p. 414-421.

Comme beaucoup, Gassendi écrit en latin, avec de nombreuses citations en grec, et on doit à son disciple et ami François Bernier, médecin et grand voyageur, la traduction un peu adaptée d'une grande partie des *Opera Omnia* parues en 1658, sous le titre d'*Abrégé de la philosophie de Gassendi*, parue en 1674, rééditée et abondamment complétée en 1684. Si la traduction est dans l'ensemble fidèle, Bernier procède à quelques modifications qui induisent des erreurs si on respecte ce texte sans discernement. En effet, il était alors un peu tard pour défendre des thèses corpusculaires en ce qui concerne le son, du fait des progrès, notamment en pneumatique, qui rendaient obsolète la modélisation atomiste. Néanmoins, au-delà de cette théorie incorrecte, on attribue généralement deux formulations innovantes à Gassendi concernant la vitesse du son, l'une est vérifiée mais déjà formulée par Mersenne, l'autre non, car elle est le fait d'une interprétation abusive de la traduction de Bernier<sup>393</sup>.

Selon Gassendi, le son est un flux de corpuscules et ses différentes propriétés sont établies par les caractéristiques de ce mouvement. François Bernier résume assez correctement les premières pages du chapitre des *Animadversiones* de Gassendi consacrées au son et à l'audition<sup>394</sup>:

[...] le son n'est point une simple qualité, mais ce ne doit être autre chose que des corpuscules qui étant figurés d'une certaine manière, et transportés d'une grande vitesse depuis le corps sonnant jusqu'à l'oreille, meuvent l'organe, et causent cette sensation qu'on appelle *audition*, si l'on peut aussi se servir de ce terme, entendre, ouïr. C'était la pensée de plusieurs anciens philosophes, dont les uns, comme Démocrite et Epicure ont dit, *que la voix, ou le son est un flux, ou un écoulement de petits fragments figurés d'une même façon* ; les autres, comme Platon, *Que c'est un certain battement de l'air fort et violent*, avec Aristote, *Que c'est une certaine motion d'air*, enfin, comme les Stoïciens, *Que c'est le choc, ou le frappement de l'air*.

Or quoiqu'il y a quelque différence dans la pensée de ces philosophes, néanmoins ils ont tous enseigné que le son est quelque chose de corporel, tant parce qu'il a la force d'agir, comme d'exciter et de mouvoir nos sens, que parce qu'il se réfléchit à la manière des corps, ce qui fait que nous l'entendons plusieurs fois : et c'est ce son réfléchi qu'on appelle écho.

Le texte de Gassendi contient des développements argumentaires plus importants pour affirmer la nature corporelle du son, et réfuter la 'simple qualité' des Scolastiques. Le thème de l'écho est également largement développé parce qu'il constitue le socle de la conception corpusculaire du fait de l'analogie avec les lois de la mécanique déjà invoquées par Gassendi en ce qui concerne la lumière.

En outre, la puissance de la théorie corpusculaire est établie sur la possibilité pour les sons de conserver ce qu'on appelle le 'timbre', et que les atomistes désignent par 'configuration' ou 'figures'. Ainsi, Bernier traduit le passage de Gassendi<sup>395</sup> :

Or cette diversité de sons, et principalement de voix, ou de lettres tant consonnes, que voyelles, nous donne lieu de conjecturer que pour le son il est requis une certaine configuration ; car cette diversité de sons ne semble pas pouvoir être distinguée par le sens si l'organe n'est diversement affecté, et l'organe ne peut être diversement affecté qu'à raison de la diverse texture, ou configuration. Et afin qu'on ne croie pas que cette configuration soit une chose si fort absurde, nous avons insinué que Pythagore, Platon, et Aristote l'approuvent lorsqu'ils disent, *que la figure, qui se fait dans l'air et dans sa superficie par un certain coup, devient voix*; du moins ne saurait-on douter d'Aristote, puisqu'il fait en termes exprès cette question : *D'où vient que la voix étant un certain air figuré, et qui souvent perd sa figure en passant d'un lieu à un autre, il la conserve néanmoins en son entier lorsqu'il est réfléchi par un corps solide* ? L'on ne peut pas même nier que ce flux de corpuscules d'air, qui sont très subtils, et qui sont comprimés, et brisés par le choc des corps, ne puisse aisément prendre une certaine figure, puisque même les tourbillons des vents le marquent : et certes, quelle difficulté y a-t-il que lorsque la bouche pousse, et forme une voix, ou que quelque autre corps produit un son, la texture des corpuscules qui coulent soit comprimée, et comme brisée d'une telle manière qu'elle soit réduite en petits fragments, ou en molécules formées de même façon, et que ces molécules jaillissent en foule ça et là, et se répandent dans tout l'espace circonvoisin, conservant cependant leur ressemblance entre elles jusqu'à l'ouïe, et retenant certaines marques de leur formation par le moyen desquelles elles se fassent distinguer ?

<sup>393</sup> La première de ces théories est celle qui affirme que la vitesse du son est indépendante de la hauteur. La seconde fait de Gassendi le premier savant à avoir mesuré la vitesse du son, alors que lui-même rend hommage à son ami Mersenne pour cette expérience. Voir le chapitre consacré à la vitesse du son.

<sup>394</sup> Pierre Gassendi, *Animadversiones in decimum librum Diogenii Laertii*, Lyon, Anisson, 1649, t 1, p.273. François Bernier, *Abrégé de la philosophie de Gassendi*, Anisson, Lyon, 1684, T. III, liv. I, chap. 12, p. 181-182.

<sup>395</sup> Gassendi, *Animadversiones*, t. 1, p. 276-277. Bernier, *Abrégé*, t III, p. 188.

La question d'Aristote évoquée par Gassendi est issue des *Problèmes IX* qui traitent de la voix, et l'argument est involontairement infondé puisque ces *Problemata* n'ont été écrits que bien après la mort du philosophe, à une époque où les thèses d'Epicure et l'usage de la notion de 'figure' étaient probablement répandus au-delà de l'école atomiste. Cependant Gassendi et Bernier, comme leurs contemporains, n'avaient pas de raison de douter de l'authenticité de l'auteur. Par ailleurs, dans l'édition de 1674 Bernier utilise l'expression 'petites masses', mais dans celle de 1684 il préfère le terme 'molécules' alors passé dans le langage courant, pour ces 'configurations' que Gassendi désigne 'petits morceaux' (*frustula*, de *frustum*, petite bouchée de pain) :

[Cum...sonus] abeat in frustula seu parvulas moleis consimiliter inter se formatas [...] conservent.

Gassendi introduit ici cette notion essentielle de molécules qui est à la base de sa physique atomiste de la matière. Les molécules de Gassendi sont des assemblages semblables de corpuscules (atomes) qui prennent une certaine configuration et la conservent, ici durant la propagation du son (et également de la lumière).

Une difficulté se pose alors, celle de la multiplicité de ces assemblages identiques qui parviennent par exemple aux oreilles d'une foule assemblée. Gassendi propose une solution élégante, semble-t-il déjà évoquée par Epicure, et rapportée ici par Bernier<sup>396</sup> :

Plutarque rapporte une comparaison d'Epicure qui explique merveilleusement la chose ; elle est prise de ce soufflement, ou épanchement de corpuscules d'eau que les foulons font d'ordinaire avec la bouche sur leurs draps. Car de même que, par ce soufflement, une très petite quantité d'eau est divisée et répandue en un nombre innombrable de petites gouttes, ainsi, une très petite particule d'air peut être divisée et répandue en un nombre innombrable de petites voix. Remarquez cependant que par ce mot d'air je n'entends pas toute sorte de flux d'air, ou de souffle, car toute la masse de l'air ne semble pas être mue, mais seulement ce qu'il y a de plus subtil dans l'air, et qui est principalement capable de prendre figure.

Je sais bien que Plutarque demande comment il est possible que tout un théâtre, qui contient des milliers d'hommes, soit rempli de petits fragments d'air. Mais comme nous voyons que ce peu d'eau que tient un foulon dans sa bouche arrose par cet épanchement qu'il en fait, et remplit un espace assez considérable, quoique les gouttes demeurent encore assez grossières, de même il semble que l'on peut dire qu'un peu d'air étant diffus, et répandu en une espèce de rosée, peut remplir un espace beaucoup plus ample. Du moins ne saurait-on nier que la comparaison n'ait lieu, en ce que, de même que plus les petites gouttes sont proches de la bouche du foulon et par conséquent, plus pressées ou serrées, plus elles arrosent abondamment, de même aussi, moins les petites voix sont éloignées de la bouche de celui qui parle et sont par conséquent plus pressées, plus elles frappent l'oreille, et plus fortement, et plus distinctement elles nous font entendre.

La modélisation par le flux divisé en gouttelettes permet l'explication à la fois de la perception semblable par plusieurs personnes, ainsi que de la notion d'intensité assimilée ici à la concentration des gouttelettes lorsque le flux est proche de sa source.

Dans la lettre à Licetti qui date de 1640, soit neuf ans avant les *Animadversiones*, Gassendi utilise déjà cette analogie des gouttelettes<sup>397</sup> :

Si enim aqua ore elisa effundi potest in speciem nubis, minutasve guttulas, seu aqueas moleculas innumeras consimiliter figuratas : quid-ni possit aer in innumerabiliter plureis, ipse praesertim tenuior, et figurabilior, quam aqua ? Ergo, ut dici quidem potest una aqua esse diffusa ; sed non aedem tamen guttulae sunt, quae huc, illucque diffunduntur, et has, illasve panni parteis contingunt, atque madefaciunt ; ita aer ore extritus dici quidem potest unus, seu una generalis vox : sed non sunt tamen eaedem illius particulae, seu moleculae, vel particulares voces, quae huc, illucque transferuntur, diversasque ut guttulae aquae, quo sunt confertiores, eo possunt facilius, et uberius, propter coitionem madefacere : ita voculas singulareis, quo condensiores fuerint, eo plureis ingredi in aures, et plenius, atque perfectius pro suae configurationis ratione afficere sensum. Ex quo fit, ut vox prope Oratorem percipiatur vehementius et distinctius, procul debilius et confusius ; donec, si pergatur ulterius, nihil audiri valeat, quod voculis, aut raris, aut nullis, sensus percellatur.

[En effet, si l'eau sortie de la bouche peut être répandue sous forme de nuage, ou de petites gouttelettes, ou d'innombrables molécules aqueuses configurées de façon semblable, l'air, tellement plus ténu et plus façonnable que l'eau, ne le pourrait-il pas, dans un très grand nombre de fois plus nombreuses ? [...]]

<sup>396</sup> Gassendi, *Animadversiones*, t. 1, p. 277-278. Bernier, *Abrégé*, t III, p. 189-190.

<sup>397</sup> Pierre Gassendi, *Epistolae quatuor de apparente magnitudine solis humilis et sublimis*, lettre II à Fortunio Liceti, août 1640, in *Opera omnia*, Lyon, Anisson, t 3, p. 444-445.

Dans cet extrait, Gassendi compare le jet d'une eau propulsée par la bouche, d'abord en un flux unique puis en fines gouttelettes, avec la voix qui, d'abord flux unique à la sortie de la bouche, se diffuse en un grand nombre de 'petites voix', semblables à ces gouttelettes, et semblables entre elles. D'abord concentrées, près de la bouche, elles procurent à la voix générale sa puissance, puis à mesure qu'elles s'éloignent de la source, elles se dispersent et l'intensité du son décroît jusqu'à disparaître lorsque le flux n'est porteur que de quelques 'petites voix' trop rares pour affecter l'ouïe.

L'intensité du son est, pour Gassendi, corrélée à la concentration des corpuscules, et cette modélisation évoque la notion de pression de l'air, notion alors en gestation grâce aux expériences de Pascal et de Torricelli. Toutefois Gassendi semble ignorer la masse de ces corpuscules qui devrait leur conférer une trajectoire infléchie, ce qui n'est jamais observé. De même on ne sait pas ce que deviennent ces corpuscules sonores accumulés ça et là, surtout dans les environnements particulièrement bruyants.

## La vitesse du son et la 'fréquence'

Gassendi fait une expérience concernant le mouvement du son, et particulièrement sa vitesse. Il déclare notamment que la vitesse du son est constante, quelle que soit sa hauteur, et qu'elle n'est pas affectée par le vent<sup>398</sup> :

Je remarque seulement une chose tout à fait surprenante à l'égard du mouvement de l'air qui tend du corps sonnant vers l'oreille, c'est que, de quelque impétuosité qu'il soit agité par le corps sonnant, il traverse toujours l'espace d'une égale vitesse. Car il est constant par l'expérience que les sons, petits ou grands, qui se font dans un même endroit, sont tous portés en un temps égal au lieu d'où ils sont entendus : c'est ce qui se peut aisément observer dans les sons des armes à feu qui sont éloignées de deux ou trois mille, lorsque ayant remarqué le moment auquel la flamme, qui est produite en même temps que le son, paraît aux yeux, l'on compte les battements d'artère, ou les allées et venues d'un pendule jusqu'à ce que le son parvienne à l'oreille ; car l'on remarque que les allées et venues qui sont d'ailleurs d'égale durée, sont égales en nombre, soit que le son se fasse par une grande machine, telle qu'est un canon, ou par une petite, telle qu'est un mousquet.

Les stoïciens insinuent la manière dont la chose se peut faire, en ce qu'ils enseignent, comme nous avons dit plus haut, que, l'air qui est frappé étant continu, il se forme en cercle, de même qu'une eau tranquille dans laquelle on jette une pierre ; car, que la pierre soit petite ou grande, qu'elle tombe avec force ou tout doucement, cette production de cercles dans l'eau ne s'en fait pas, prétendent-ils, pour cela plus vite ou plus lentement, mais elle est continuée d'une même teneur jusque au rivage. Et cette comparaison semble d'autant plus propre, qu'elle donne moyen d'expliquer pourquoi le son parvient à l'oreille plus lentement que l'espèce visible à l'oeil ; le trajet de l'espèce se faisant directement, sans cette production de cercles, et l'espèce n'étant par conséquent pas sujette à être retardée de même.

Vient ensuite le récit de l'expérience de Mersenne sur la mesure de la vitesse du son, que Bernier a transformé, dans son édition de 1684, en récit de sa propre expérience, ce qui a induit en erreur de nombreux commentateurs insuffisamment scrupuleux qui ont attribué à Gassendi la paternité de cette mesure<sup>399</sup>.

L'analogie avec les ronds dans l'eau, acceptée par Gassendi quoique d'origine stoïcienne, fournit la transition avec l'étude de la hauteur des sons, selon l'hypothèse atomiste. Il est nécessaire pour Gassendi de dissiper l'explication confuse qu'Aristote expose dans le *Traité de l'âme* à propos de la vitesse des sons graves et aigus. Il s'agit d'une énonciation importante, largement inspirée par Mersenne<sup>400</sup> :

<sup>398</sup> Gassendi, *Animadversiones*, t. 1, p. 279-280. Bernier, *Abrégé*, t III, p. 194-196. La traduction de Bernier est ici fidèle.

<sup>399</sup> Voir le chapitre consacré à la vitesse du son. Gassendi écrit dans les *Animadversiones* (p.280) :

« Quo loco tacenda non est Mersenni nostri observatio, qui velocitatem soni studiose emensus, deprehendit ipsum uno horae secundo pervadere ducentas triginta parisinas orgyas... » (En ce lieu, nous ne devons pas taire l'observation de notre Mersenne, qui mesurant rigoureusement la vitesse du son, découvrit qu'il parcourait deux cent trente toises parisiennes en une seconde d'heure).

<sup>400</sup> Gassendi, *Animadversiones*, t. 1, p. 280.

Marin Mersenne, *Harmonie Universelle*, Paris, 1636, t. 1, livre I :

Prop. VII, pour le grave et l'aigu :

bien entendu Mersenne ne se place pas dans une position atomiste, et parle de 'battements' et de 'tremblements' de l'air :

« Or il n'y a point d'autre cause de la gravité des Sons, que la rareté des battements, c'est-à-dire que le petit nombre des secousses et tremblements de l'air »

Prop. XIII pour la vitesse constante et le grave déterminé par le nombre de battements :



Ex his autem elicitur, videri sonum in aere creari non tam velocitate, quam crebritate motus ; et discrimen soni acuti et gravis oriri non ex velociore aut tardiore motu, ut censuit Aristoteles, sed ex frequentiore aut infrequentiore.

[De ceci, donc, on retire que le son est engendré dans l'air non tant par la vitesse que par la répétition du mouvement ; et que la différence entre les sons graves et aigus provient non du mouvement plus rapide ou plus lent, comme le pensait Aristote, mais d'un mouvement plus ou moins réitéré.]

On note l'apparition à plusieurs reprises de l'adjectif *frequens*, avec son contraire inventé pour l'occasion *infrequens*, qu'il est impropre de traduire par 'fréquent' en raison du caractère anachronique que cette notion pourrait induire. *Frequens* exprime plutôt l'idée de nombre, de répétition, de réitération, voire d'abondance. Gassendi est en train d'inventer un vocabulaire de la physique des sons, et l'emploi de '*frequens*', qui signifie rarement 'fréquent', marque, en principe, l'idée de nombre d'événements dans une même unité de temps. Galilée dans les *Discorsi* évoque cette notion d'une périphrase, '*sotto le medesime misure di tempi*', ou '*sul medesimo tempo*'. Mersenne pour sa part, s'il a parfois utilisé le terme 'fréquent', parle plutôt de 'tours et retours'. L'idée est la même, toutefois, pour Gassendi, le terme de 'fréquence' ne désigne pas un nombre d'événements dans une unité de temps, mais un nombre de corpuscules parcourant un espace dans une durée donnée et à vitesse constante, ce qu'il venait d'établir. La terminologie employée ici sera reprise plus tard dans le langage de la propagation des ondes, cependant la 'fréquence' de Gassendi n'est pas la 'fréquence' des acousticiens d'aujourd'hui, même si le mot recouvre une notion qui ressemble. Il convient d'être attentif à l'usage des termes qui peut induire ou introduire inopportunément des notions qui n'existent pas encore.

Dans la *Physica*, parue en 1658, trois ans après sa disparition, Gassendi reprend son explication de la propagation du son selon l'hypothèse atomiste<sup>401</sup> :

Deinde, si requiratur etiam unde-nam fit soni acuti, et gravis ; unde vehementis, debilisque auditio, constat eam non esse, ut Aristoteles voluit ex velocitate, aut tarditate motus appulsusque ipsius ad aurem ; sed illum quidem sonum audiri acutum, qui crebrioribus ictibus percellit sensorium ; illum gravem, qui infrequentioribus : ac rursus illum vehementem, qui pluribus simul ; debilem, qui paucioribus. Nempe omnes soni sunt equi-veloces sed cum creentur a corpore, quod frequentius aut infrequentius pulset aërem ; ac iisdem pulsibus multum, paucumve moveat ; efficitur ut quo sensorium percellitur crebrius, eo fit sonus acutior ; quo minus crebro, gravior ; et rursus quo pleniore veluti affluxu percellitur, eo vehementior ; quo rariore, debilior.

[Ensuite, si l'on recherche d'où provient que l'audition du son est grave ou aiguë, forte ou faible, il est clair que ce n'est pas, comme l'a voulu Aristote, à partir de la rapidité ou de la lenteur du mouvement qui vient frapper l'oreille. Un son sera entendu comme aigu si les coups qui viennent frapper la sensibilité sont plus rapprochés, et comme grave s'ils sont moins répétés ; et de plus, on les appellera forts s'ils sont plus nombreux simultanément, et faibles s'ils sont plus rares. En effet, tous les sons sont de vitesse égale mais, lorsqu'ils sont créés par un corps qui frappe l'air plus ou moins souvent, et qu'il provoque son mouvement par ces mêmes pulsations, qu'elles soient nombreuses ou rares, il se fait que, en provoquant cette sensation par des heurts fréquents, le son se fait plus aigu, et s'ils sont moins fréquents, plus grave ; et par ailleurs, d'autant plus fortement qu'ils frappent nombreux, et d'autant plus faiblement qu'ils sont rares.]

Gassendi a évité le piège consistant à associer la hauteur du son à la vitesse, ce qui pouvait sembler naturel. Mais Gassendi venait de déclarer que la vitesse est indépendante de la hauteur, ce qui est constaté par l'expérience. Cependant, si son hypothèse fonctionne pour le mouvement du son sous forme de corpuscules, il faut déterminer quels sont les paramètres de ce mouvement associés aux propriétés du son, à savoir la hauteur et l'intensité. Puisque ces corps animés d'un mouvement dans l'espace sont dotés d'une certaine vitesse, la tentation est grande d'établir une relation entre cette vitesse et une grandeur caractéristique du son, et c'est bien entendu la hauteur du son qui est la plus appropriée. Jusqu'à cette époque, la notion de vitesse se construit lentement et sa perception est empirique et rarement mesurée. Platon et Aristote, et surtout leurs successeurs, sont très confus sur cette question de la perception du tremblement qualifié de plus ou moins rapide, lorsque le son est plus ou moins aigu. Epicure est plus clair lorsqu'il suppose une vitesse égale aux atomes en mouvement

---

« il ne s'ensuit pas que tous les mouvements d'air soient égaux en toutes choses, encore qu'ils soient égaux en vitesse, et que l'air qui fait ou qui porte le Son aigu est autrement formé, figuré, ou ému que celui qui fait le Son grave »

et plus loin :

« l'aigu du Son ne vient pas du mouvement plus vite des corps ou de l'air, mais de la seule fréquence ou vitesse des retours ou réflexions dudit air, ou des corps qui le battent et qui le divisent ».

<sup>401</sup> Pierre Gassendi, *Opera omnia*, tome 2, *Physica sectio III, liber VII, De sensibus speciatim*, cap. IV, *De auditu et auditione*, L. Anisson, Lyon, 1658, p. 365. Trad. personnelle.

dans le vide. Cette question de la vitesse, des vitesses devrait-on dire, et de leur rapport à la hauteur de son sera centrale dans l'étude de la physique du son.

En revanche la caractérisation de l'intensité est plus confuse. Dans les *Animadversiones* Gassendi propose que l'intensité soit déterminée par la concentration des corpuscules, et il utilise la comparaison avec le jet d'eau propulsé par la bouche des 'foulons'<sup>402</sup> :

Similitudo certe valet ; quod quemadmodum, quanto guttulae sunt fullonis ori propriiores, atque adeo confertiores, tanto madefaciunt copiosus ; ita et voculae, quanto ab ore loquentis vicinius absunt, et crebriores proinde sunt, tanto auditum magis feriunt, sitque vehementior, et distinctior auditio.

[...] Du moins ne saurait-on nier que la comparaison n'ait lieu, en ce que, de même que plus les petites gouttes sont proches de la bouche du foulon, et par conséquent plus pressées, ou serrées, plus elles arrosent abondamment ; de même aussi, moins les petites voix sont éloignées de la bouche de celui qui parle et sont par conséquent plus pressées, plus elles frappent l'oreille, et plus fortement, et plus distinctement elles nous font entendre.

Bernier traduit par 'plus pressées' le comparatif *crebriores*, et quoique ce terme signifie également 'plus nombreux', voire 'plus fréquent', ce qui rend la traduction délicate, Bernier voit juste, on le comprend par le contexte. Cependant, dans le passage extrait de la *Physica*, Gassendi nous dit que l'intensité est liée au nombre de corpuscules simultanément en mouvement<sup>403</sup> :

[...] ac rursus illum vehementem, qui pluribus simul, debilem, qui paucioribus.

Or, dans la phrase précédente il utilise '*crebrioribus*' pour qualifier les corpuscules en mouvement dans un son aigu. On ne peut que le traduire par 'plus fréquents', ce qui est également une possibilité de '*crebrior*' :

[...] sed il lum quidem sonum audiri acutum, qui crebrioribus ictibus percellit sensorium ;

La caractérisation de l'intensité par la 'densité' des corpuscules est acceptable et même judicieuse, en revanche, la corréler avec la quantité rend la théorie incorrecte puisque l'acuité et l'intensité, toutes deux liées au nombre, seraient alors dépendantes, ce qui est incompatible avec la réalité observée. En l'absence d'autres indications on peut invoquer l'erreur ou l'inattention de l'auteur voire de l'éditeur...

## Autres questions relatives aux sons

Dans la suite de son exposé, dans les *Animadversiones* traduits par Bernier, Gassendi s'éloigne peu à peu de la théorie strictement corpusculaire et se borne à parler de 'coups' ou de 'percussions', ce qui constitue un retour à un vocabulaire plus conventionnel adopté par tous les savants de l'époque Moderne, de Galilée à Euler. Gassendi traite notamment des cordes vibrantes, et relate l'expérience de son ami Mersenne sur le décompte des vibrations d'une longue corde tendue qui permet d'observer les 'tours et retours' de la corde. Quelques considérations sans grande originalité sur les consonances complètent le chapitre.

Gassendi achève son exposé par quelques questions assez caractéristiques des préoccupations péripatéticiennes, et traitées notamment dans les *Problemata* XI attribués à Aristote. Il s'agit de l'affaiblissement de l'intensité sonore avec la distance, du son qui traverse les obstacles, de la perception différente à l'extérieur et à l'intérieur d'une maison, et enfin de la perception plus sensible des sons au cours de la nuit. Curieusement, Bernier, dans l'édition de 1684 effectue de nombreuses coupes par rapport à l'édition de 1674 pourtant déjà expurgée. C'est ainsi qu'il ne subsiste dans l'*Abrégé* que les problèmes sur l'affaiblissement du son et sur l'audition nocturne. Il est clair que, à l'époque où Newton achevait la rédaction des *Principia*, les interrogations scolastiques paraissaient ridicules.

Gassendi traite longuement de la propagation du son par comparaison avec celle de la lumière, à travers les obstacles, ainsi que de la dégradation du son avec la distance. A cette occasion il cite abondamment Lucrèce<sup>404</sup> :

[4,550] [...] hoc ubi non longum spatium est unde illa profecta perveniat vox quaeque, necesse est verba quoque ipsa plane exaudiri discernique articulatim; servat enim formaturam servatque figuram. At si inter positum spatium sit longius aequo, aera per multum confundi verba necesse est et conturbari vocem, dum transvolat auras.

<sup>402</sup> Gassendi, *Animadversiones*, t. 1, p. 278. Bernier, *Abrégé*, t III, p. 190.

<sup>403</sup> Pierre Gassendi, *Opera omnia*, tome 2, *Physica* sectio III, liber VII, De sensibus speciatim, cap. IV, *De auditu et auditione*, L. Anisson, Lyon, 1658, p. 365.

<sup>404</sup> Lucrèce, *De natura*, livre IV, 530-620.

[4,560] ergo fit, sonitum ut possis sentire neque illam internoscere, verborum sententia quae sit; usque adeo confusa venit vox inque pedita.

[Alors, si le son n'a pas une longue distance à franchir pour parvenir au but, clairement s'entendent tous les mots et se distinguent les articulations; car la voix conserve ses inflexions et sa forme. Mais si la distance à franchir est trop grande, les mots se confondent et la voix se trouble en volant dans les airs. C'est alors qu'on entend des sons sans distinguer le sens des mots, tant la voix nous parvient confuse et embarrassée.]

Lucrèce ne fait pas preuve ici d'une grande sagacité, mais le propos permet à Gassendi de présenter le processus de dégradation du son avec la distance. Plus loin, il explique, toujours par la voix de Lucrèce, la différence de propagation entre la vision et l'audition :

[4,595] Quod super est, non est mirandum qua ratione, per loca quae nequeunt oculi res cernere apertas, haec loca per voces veniant aurisque lacessant, conloquium clausis foribus quoque saepe videmus; ni mirum quia vox per flexa foramina rerum

[4,600] incolumis transire potest, simulacra renutant; perscinduntur enim, nisi recta foramina tranant, qualia sunt vitrei, species qua travolat omnis. Praeterea partis in cunctas dividitur vox, ex aliis aliae quoniam gignuntur, ubi una dissuluit semel in multas exorta, quasi ignis saepe solet scintilla suos se spargere in ignis. ergo replentur loca vocibus abdita retro, omnia quae circum feruunt sonituque cientur. at simulacra viis directis omnia tendunt,

[4,610] ut sunt missa semel; qua propter cernere nemo saepe supra potis est, at voces accipere extra. Et tamen ipsa quoque haec, dum transit clausa {domorum} vox optunditur atque auris confusa penetrat et sonitum potius quam verba audire videmur.

Traduction :

[...] [Il n'y a pas à s'étonner que des obstacles qui dissimulent les objets à nos yeux laissent cependant les sons passer et frapper nos oreilles. Il est possible d'avoir une conversation à travers des portes fermées, nous le constatons tous les jours. C'est que la voix peut sans risque traverser les canaux les plus sinueux des corps, au lieu que les simulacres s'y refusent et se déchirent, si les conduits ne sont pas rectilignes, comme le sont ceux du verre, à travers lequel vole toute image. La voix d'ailleurs se disperse en tous sens, car les sons s'engendrent les uns les autres; un son se multiplie amplement, comme l'étincelle éclate en gerbe de feu. Aussi les sons s'emparent-ils des espaces les plus cachés et tous les lieux d'alentour les renvoient en échos. Les simulacres au contraire se meuvent en droite ligne, tels qu'ils sont émis: c'est pourquoi l'on ne peut voir à l'intérieur, par-dessus une clôture, tandis qu'on entend au-delà. Et cependant la voix s'émousse en traversant les murs des maisons, arrive confuse aux oreilles et laisse alors percevoir des sons plutôt qu'entendre des mots.]

On trouve également cette explication dans les *Problemata* XI, les sons parviennent mieux à traverser les obstacles que la lumière, à cause des pores de la matière qui laissent mieux passer l'air sonore que la lumière. Mersenne également avait évoqué cette possibilité.

Gassendi, d'après Bernier, hésite entre deux hypothèses pour expliquer la diminution d'intensité avec la distance. D'une part Lucrèce explique que les assemblages d'atomes perdent peu à peu certains de leurs constituants, et donc leur netteté, jusqu'à s'évanouir. Gassendi opte d'autre part pour une autre théorie. Puisque l'intensité du son est liée à la concentration des molécules en mouvement, il explique que la distance de propagation entraîne la dispersion et la raréfaction de nombre d'entre elles, ce qui atténue l'intensité. On n'est finalement pas très éloigné de la notion de pression qui est définie par l'application d'une force sur une surface<sup>405</sup> :

Ac videtur quidem esse probabilius audiri vocem procul et exilem et indistinctam, quod ob diffusionem vocolae jam sint nimis rariae, et quae ingrediuntur in aurem, pauciores sint, quam ut sensorium valde afficiant, et constare res eo potest, quod si manu apposita, cono excavato, aut alio artificio plures vocolae in aurem cogantur, non desinat fieri vehementior, distinctiorque auditio ; [...]

Bernier traduit de façon relativement fidèle dans l'édition de 1674, après ce paragraphe destiné à résumer le long développement de Gassendi et ses citations de Lucrèce et d'Epicure que Bernier qualifie de 'quelques philosophes' :

[...] quelques philosophes ont cru que cela arrivait parce que ces petites masses ou petites voix, en traversant un long espace d'air, ou en passant à travers les cloisons, perdent insensiblement cette convenance ou ressemblance mutuelle qu'elles ont dès le commencement, et

<sup>405</sup> Gassendi, *Animadversiones*, t. 1, p. 284.

que les petites parties dont elles sont formées se séparent, en sorte qu'elles ne parviennent pas à l'oreille toutes entières avec la même figure et la même contexture qu'elles avaient.

Il y en a d'autres [philosophes] qui ont voulu, et ce semble avec plus de probabilité, que la voix ne s'entend ainsi de loin, faible, petite et sans distinction, que parce qu'en se répandant de toutes parts, les petites voix deviennent trop rares, et qu'il en parvient trop peu à l'oreille pour affecter et ébranler beaucoup l'organe. Et la preuve de ceci est que si l'on rassemble dans l'oreille plusieurs de ces petites voix, soit avec la main soit avec un cornet, ou par quelque autre artifice, on ne laisse pas d'entendre plus fortement et plus distinctement ;

Puis Bernier, qui présente l'hypothèse de Gassendi, la seconde dans son texte, comme étant celle d'"autres philosophes", ajoute le passage suivant qui exprime l'hésitation du savant :

Néanmoins, la première raison a beaucoup de probabilité, parce qu'il semble que la figure des petites masses, ou petites voix, doit se changer et enfin se dissiper, même entièrement, par les diverses rencontres qu'elles font en traversant l'air ou même par leur propre impétuosité.

Gassendi écrivait alors :

[...] sed potest tamen sua quoque huic conturbationi manere probabilitas, quod figura vocum, seu molecularum vario per aerem offensu, aut proprio etiam ex impetu videatur debere sensim evanare, ac tandem evanescere.

Gassendi n'avait pas présenté les deux théories successivement, comme le fait Bernier, et il semble un peu audacieux de traduire « *sed potest tamen sua quoque huic conturbationi manere probabilitas* » par « *Néanmoins, la première raison a beaucoup de probabilité* ». Il est clair que Bernier, en 1674, éprouve une certaine réticence à défendre une théorie qui attribue l'intensité du son à une concentration des corpuscules alors que la notion de pression de l'air connaît un certain succès. La théorie pneumatique et ondulatoire, reconnue alors par la communauté scientifique, ne pouvait pas se satisfaire de ces suppositions. Il était plus réaliste, et plus imprécis, d'invoquer les perturbations dues à la propagation pour expliquer la dégradation du son.

Dans l'édition de 1684, Bernier taille encore dans le texte de Gassendi, et la traduction des trois pages de Gassendi devient très confuse:

[...] quelques-uns ont cru que cela venait de ce que ces molécules ou petites voix particulières perdent peu à peu en passant cette convenance mutuelle qu'elles ont au commencement et la liaison des particules dont chacune est comme formée ; et ceci est d'autant plus probable qu'il semble que la figure des molécules ou petites voix doit, par la rencontre différente de l'air ou par leur propre impétuosité, être peu à peu changée, et enfin s'évanouir.

Ici, l'allusion au cornet acoustique a disparu. Elle emmènerait Bernier dans un domaine qu'il connaît peu mais qui passionne la communauté scientifique d'alors, l'amplification des sons par des instruments acoustiques.

Il est important de souligner ces ajouts et ces modifications qui apparaissent ça et là dans l'*Abrégé* de Bernier, car l'ouvrage est perçu comme une traduction fidèle, notamment à partir du XIX<sup>ème</sup> siècle où le latin commence à perdre son importance. Bernier n'est pas un savant, mais il dispose d'une formation assez poussée pour lui permettre de comprendre le texte de Gassendi et pour juger de sa pertinence dans le contexte de la science de son temps, vingt ans après la mort de son maître. Et, de 1650 à 1680 la connaissance a fait des progrès considérables, en particulier en ce qui concerne la physique de l'air. Les historiens qui, plus tard, se pencheront sur la théorie de Gassendi, se référeront à la traduction de Bernier, la croyant fidèle, et commettront de nombreuses inexactitudes. Le renouveau de l'intérêt pour Gassendi, dans la seconde partie du XX<sup>ème</sup> siècle a contribué à corriger ces erreurs.

Le dernier problème, typiquement péripatéticien, traité par Gassendi concerne la différence de propagation du son le jour et la nuit. Elle est souvent abordée par les Anciens, puis dans les encyclopédies du Moyen Âge, et dans les traités scolastiques. On considère généralement que le son se propage plus loin et plus distinctement la nuit que le jour, et on explique le phénomène par la différence de température, la constitution de l'air et par d'autres hypothèses. Or déjà Plutarque, dans les *Symposiaques*, avait évoqué l'explication plausible de cette constatation<sup>406</sup>. Gassendi la reprend et, après avoir réfuté les arguments d'Aristote, il confirme<sup>407</sup> :

Id interim notatu dignum, neque Boethum, aut alium apud Plutarchum differentem, neque item Aristotelem id tractantem, ac retractantem, attendisse videri causam omnium verisimillimam, ex vigente illo per noctem silentio petendam. Quippe cum interdiu tum animalia caetera, tum praesertim homines, aut clamando, aut incedendo, aut organia varia, resque sonoras varie tractando aerem varie agitent, et confuso quodam sono quasi compleant ; noctu nihil tale, aut

<sup>406</sup> Plutarque, *Symposiaques*, livre 8, 3.

<sup>407</sup> Gassendi, *Animadversiones*, t. 1, p. 287.

non aeque contingit; et vox proinde liberior, irrefractorque permeat et vehementius, distinctiusque auditur.

[Cependant c'est une chose à remarquer, que ni Boëthus, ni aucun autre, ni Aristote même, qui en plusieurs endroits a traité cette matière, n'aient pas pris garde que la cause la plus vraisemblable de toutes se doit tirer de ce grand silence qui règne durant la nuit : car pendant le jour tous les animaux, et principalement les hommes, en criant, en marchant, ou en maniant divers instruments et divers corps sonnans, agitent diversement l'air, et le remplissent pour ainsi dire, d'un certain son confus, au lieu que la nuit tout cela cesse, de sorte que la voix passe plus libre, et plus entière, et est entendue plus forte, et plus distincte.]

Le Boethus cité ici n'a rien de commun avec Boèce, il s'agit d'un des personnages du dialogue de Plutarque, qui propose une explication atomiste inspirée d'Epicure et que Gassendi commente en critiquant le texte de Plutarque. Le ton de cette conclusion est plus ironique chez Gassendi que chez Bernier, qui semble ne pas apprécier Plutarque, jamais cité, et cette conclusion constitue une espèce de pirouette en forme de 'coup de pied de l'âne' envers Aristote et les Scolastiques.

Gassendi, comme tous les savants qui écrivent sur le son, utilise une analogie aquatique pour représenter la propagation des sons, mais à l'inverse des Stoïciens et des Scolastiques qui répétaient depuis l'Antiquité la sempiternelle comparaison avec les ronds dans l'eau, pour Gassendi, il s'agit plutôt d'une espèce d'arrosage, à la manière des 'foulons'. En revanche l'hypothèse corpusculaire pour le son ne suscitera pas les mêmes débats que pour la propagation de la lumière, et elle sera bien peu défendue par la suite. C'est ainsi que Newton, pourtant considéré comme corpusculariste quant à la lumière, développe une approche pneumatique très cohérente en ce qui concerne la propagation du son.

## 6 - Sons et rayons de lumière

On trouve, chez les auteurs anciens, les premières théories développant l'analogie entre son et lumière. Ce n'est pas étonnant, puisque leur approche était avant tout celle d'une étude des sensations. La vue et l'ouïe sont donc présentées et comparées. On trouve ces thèmes chez les présocratiques, chez Aristote et chez tous les philosophes médiévaux qui vont inspirer les savants du XVII<sup>ème</sup> siècle à travers leur formation essentiellement scolastique.

### *L'analogie son et lumière au début du XVII<sup>ème</sup> siècle*

Cette analogie se développe au XVII<sup>ème</sup> siècle, notamment chez les Jésuites jusqu'en 1660, vers une tentative d'assimiler les lois de la propagation des sons à celle de la lumière, c'est-à-dire en invoquant l'instantanéité et l'application stricte des lois de réflexion de 'rayons sonores' analogues à celles de la catoptrique.

La conception de la propagation des ondes sonores reste, jusqu'au XVIII<sup>ème</sup> siècle, fondée sur des propriétés observées, et particulièrement sur la propriété de réflexion du son dans l'écho. L'observation de ces réflexions conduit bien entendu à la comparaison avec les propriétés de la lumière déjà bien maîtrisées par les savants, et elles-mêmes issues de l'observation des chocs mécaniques. Ces propriétés sont largement connues concernant la lumière, elles obéissent à la loi de l'égalité de l'angle d'incidence et de l'angle de réflexion. Cette façon de concevoir la propagation des sons est tout à fait conforme aux lois de la géométrie, paradigme dominant à cette époque dans l'étude des phénomènes naturels. L'étude géométrique des trajectoires est à la base des lois connues qui gouvernent la mécanique, l'astronomie et l'optique. Dans ce contexte, l'étude de la propagation des sons est avant tout l'étude des 'lignes sonores', et l'analogie avec le rayon lumineux est inévitable.

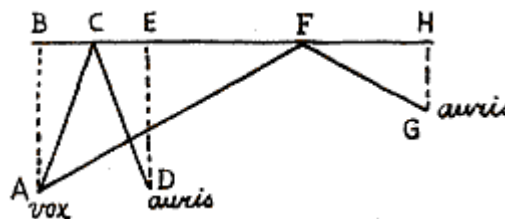
L'observation méthodique des phénomènes d'écho vient confirmer cette approche géométrique de la propagation des sons. Et, alors que Francis Bacon, Mersenne et Huygens émettent de sérieux doutes, de nombreux savants, encore à la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle, vont systématiser l'analogie avec la lumière, et développer des théories parfaitement parallèles. Le son, selon eux, se propage comme la lumière.

### **Beeckman**

Isaac Beeckman, dont on ne dispose que d'une correspondance et d'un journal, était un partisan de l'atomisme renaissant au début du XVII<sup>ème</sup> siècle. Le son est formé de particules qui forment des arrangements correspondant à leurs caractéristiques de timbre et de hauteur. En conséquence, le mouvement d'un flux sonore qui rencontre un obstacle obéit aux lois mécaniques, et la réflexion du son sur une paroi est semblable au choc d'un projectile contre une surface plane, avec l'angle de réflexion égal à l'angle d'incidence, comme pour la lumière, que Beeckman imagine également corpusculaire.

Vocis locum invenire unde veniat.

Si solo auditu vocis alicujus velis scire locum, unde vox prodit, reflectatur vox ad corpus aliquod, et bis diverso loco stans, illum audias, et quaere punctum aliquod in quod lineae, ab aure tua ad corpus secundum aequales angulos reflexae, utraque desinant. Punctus hic erit locus vocis.



[Trouver la position d'où vient la voix.

Si, comme unique auditeur, tu veux connaître la position de la voix de quelqu'un, d'où la voix provient, la voix se réfléchit sur un corps quelconque, te tenant dans deux endroits différents, écoute le et cherche le point où les lignes qui partent de ton oreille vers le second corps arrêtent des angles égaux de réflexion. Ce point est le lieu d'où vient la voix.]

Beeckman rencontre toutefois un problème avec la faculté pour les flux sonores de contourner les obstacles. C'est une des objections à la théorie corpusculaire de la propagation des sons. Le problème se pose pour les flux sonores et de leurs éventuelles percussions, lors de croisements de conversation, par exemple. En effet, si les 'grains de sons' sont amenés à se choquer, ils devraient alors voir leurs trajectoires perturbées, ce qui n'est pas observé, puisque les sons conservent leur intelligibilité et donc ne sont pas altérés par une percussion entre eux.

Cependant la théorie des 'grains de son' est séduisante parce qu'elle intègre correctement les caractéristiques de hauteur de son (liée à la cadence d'émission des corpuscules), de timbre (lié à la 'figure' des corpuscules) et d'intensité (qui correspond à la concentration des corpuscules en mouvement). Par ailleurs, les lois de la mécanique s'adaptent au phénomène de réflexion, et donc à l'écho, par la 'constatation', ou plutôt la supposition de l'existence d'un angle de réflexion après la percussion d'une paroi. Cette approche, qui, en outre, justifie la durée de propagation par le transport des 'grains de sons', permet une analogie avec les rayons lumineux, ce qui est alors couramment admis par les auteurs. En revanche, cette théorie néglige le rôle de l'air dans la propagation des sons.

Beeckman évoque à plusieurs reprises la physique des sons, mais approfondit peu les questions qu'il soulève. Il dispose, comme beaucoup de ses confrères, d'une formation musicale solide, et ce sont surtout les questions harmoniques qui l'intéressent lorsqu'il traite des phénomènes sonores. Ami du jeune Descartes, Isaac Beeckman sera l'inspirateur du *Compendium musicae*, un des premiers textes (1618) du jeune philosophe, qui ne traite que d'acoustique musicale<sup>408</sup>.

## Mersenne

Si Mersenne admet qu'il existe plusieurs différences entre les propagations de la lumière et des sons, il exploite de façon systématique la comparaison et en vient même à émettre l'hypothèse d'une lumière qui serait une sorte de mouvement, ce qui est audacieux à cette époque. La proposition XXV du livre I est entièrement consacrée à cette comparaison, et il est clair que pour Mersenne les deux phénomènes sont identiques quant à leur processus de propagation. Il n'hésite pas à parler de 'rayons de son' et les réflexions dans les miroirs doivent forcément trouver leur équivalent sonore, ce qu'il développe dans les propositions suivantes, après avoir longuement traité de l'écho. Il est clair que pour Mersenne il existe une fonction théologique à cette propagation rayonnante, tant de la lumière que des sons. Le rayon lumineux proviendrait de Dieu, alors que les rayons sonores seraient des messages envoyés à Dieu par le monde en mouvement, ainsi que Mersenne l'expose dans sa conclusion du chapitre<sup>409</sup> :

[...] J'ajoute seulement que l'on peut s'imaginer que toutes les créatures sont semblables au mouvement, comme témoignent leurs changements et leurs altérations perpétuelles : en suite de quoi l'on peut dire que tout le monde n'est qu'un Son, qui nous sert de parole, et de prédication pour nous faire rapporter tout ce qui est dans le monde à Celui qui lui donne le mouvement, et pour nous avertir qu'il n'en faut user qu'à sa gloire, et selon sa sainte volonté.[...]

Cette application à la prédication de la parole divine par les moyens de communication visuels et auditifs est souvent reprise par les successeurs du savant religieux, notamment par le père jésuite Kircher.

Mersenne admet les limites de la comparaison, et notamment il remarque que le son peut prolonger son effet au-delà de l'extinction de sa cause<sup>410</sup> :

[..] le Son ne dépend pas des corps dont il a été fait, parce qu'il ne leur sert pas de propriété, car son propre sujet, à savoir l'air, est d'une différente nature, et se meut longtemps après le repos des corps par lesquels il a été mu et battu.

Cependant Mersenne convient qu'il est impossible de conserver le son, et :

<sup>408</sup> Dès la première page de l'*Abrégé de la musique*, Descartes écarte toute approche physique de la propagation du son : « les propriétés du son les plus remarquables sont deux, sçavoir, ses différences considérées par rapport au temps ou à la durée, et par rapport à la force ou à l'intention du son, considéré en tant que grave ou aigu : Car quant à la nature et à la qualité du son, sçavoir de quels corps, et de quels moyens on doit se servir pour le rendre plus agréable, cela regarde les Physiciens. » (René Descartes, *Traité de mécanique et Abrégé de la musique*, Paris, Angot, 1668, p. 53).

Descartes ne reviendra plus sur la physique des sons dans son œuvre. On trouvera, ça et là dans sa correspondance, des bribes de théorie qui n'ont jamais été rassemblées de façon cohérente dans un ouvrage, ou ne serait-ce que dans un chapitre.

<sup>409</sup> *id.* prop. XXV.

<sup>410</sup> *id.* prop. IX.

[...] L'on ne doit faire nul état de ce que quelques-uns se sont vantés de pouvoir enfermer un Son, un chant, et un concert dans un coffre, à l'ouverture duquel l'on entende le même concert qui avait été fait longtemps devant.

Mersenne n'était pas un grand visionnaire...<sup>411</sup>

Mersenne distingue bien la lumière, qui est celle de la source et qui se reflète sur les objet en les rendant visibles, du son dont le 'sujet' est l'air en mouvement. Mais l'effet reste comparable<sup>412</sup> :

[...] Comme la lumière nous fait paraître les différentes couleurs des corps suivant les différentes incidences et réflexions qu'elle fait sur leurs surfaces, les Sons font semblablement paraître les différentes qualités des corps, par le moyen du mouvement de l'air qui touche et qui frappe leurs surfaces.

Curieusement, « Il est aisé de prouver que le Son est plus subtil que la lumière, puisqu'il passe à travers les corps opaques »<sup>413</sup>, ce qui contredit l'opinion courante qui attribue un pouvoir de pénétration plus important à la lumière, notamment dans les corps diaphanes. Mais « La lumière est invisible comme le Son », et les deux phénomènes sont « des mouvements qui nous renvoient les qualités des objets qui nous paraissent en être la cause »<sup>414</sup>.

C'est ainsi que les Sons rendent le mouvement de l'air sensible, et qu'ils nous font remarquer plusieurs qualités des corps que nous ne pouvons connaître que par leur moyen : et si l'on considère bien attentivement la nature de la lumière, l'on trouvera peut-être qu'elle n'est autre chose qu'un mouvement de l'air, qui porte avec soi l'image de son premier moteur, à savoir du corps lumineux, pour le rendre sensible à l'œil sous le nom et l'apparence de couleur ou de lumière, comme le Son n'est autre chose que le mouvement du même air, qui porte avec soi les qualités de sa cause efficiente, à savoir des corps qui le meuvent, dont il nous fait appréhender l'image sous le nom et l'apparence du Son.

L'analogie est audacieuse car elle suppose l'existence d'un son 'moteur', assimilable au soleil ou à la source de lumière, et dont les corps sonores ne seraient que les reflets. Mersenne ne s'étend pas sur cette théorie imprudente..

L'analogie la plus importante entre son et lumière est celle qui est suggérée par la réflexion des rayons lumineux sur un miroir, sans perte d'intensité. Rien n'interdit donc d'imaginer des 'miroirs sonores'<sup>415</sup> :

[...] L'on ouïra aussi bien le Son de loin que de près, si l'on ramasse autant de mouvements d'air par le moyen d'un miroir, tandis que ledit air se meut, pour les faire réfléchir au lieu où l'oreille se rencontrera, comme l'on voit aussi clair à la lumière d'une chandelle de loin que de près, à raison de la réflexion du même miroir, ou de la réfraction des lentilles.

Alors Mersenne poursuit la comparaison, et en vient à la réfraction. Mais il doit reconnaître que la propagation du son n'obéit pas aux mêmes lois, et en particulier qu'il est difficile d'admettre qu'on puisse réaliser des amplificateurs de sons utilisant les propriétés de réfraction, comme dans le cas des lentilles pour la lumière<sup>416</sup> :

Mais je ne croie pas que les rayons des Sons soient susceptibles de ces figures [les lentilles grossissantes] par l'industrie des hommes. Quant aux Anges, s'ils disposent des tremblements de l'air comme il leur plaît, je ne doute pas qu'ils ne puissent faire la même chose des Sons que de la lumière.

Mersenne a une confiance inébranlable dans l'ingéniosité des anges qui ont une solution à tous les problèmes posés aux hommes... Cette idée d'amplifier les sons grâce aux propriétés supposées de la réfraction des sons reviendra à la fin du siècle avec Narcissus Marsh.

Néanmoins Mersenne exploite la proposition de concentration des sons consécutive à la propriété de réflexion des sons dans un 'miroir sonore'. Il spéculé alors sur la réflexion des rayons sonores, et notamment sur la concentration qui en résulte lorsque le miroir est de forme parabolique. La réflexion simple explique le

<sup>411</sup> On ne sait pas à qui Mersenne fait allusion ici. Cyrano de Bergerac, dans son *Voyage dans la lune*, évoque ces machines parlantes qui remplacent les livres, mais son ouvrage est postérieur de quelques décennies à celui de Mersenne. Francis Bacon fait allusion à ce genre de prodige dans la *Nouvelle Atlantide*. Il semble que cette légende circulait à cette époque.

<sup>412</sup> *id.* prop. XXV.

<sup>413</sup> *id.* prop. X.

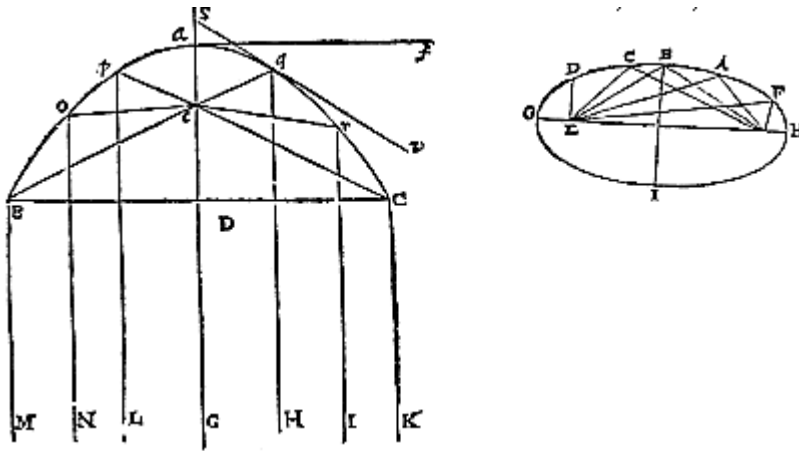
<sup>414</sup> *id.* prop. XXV.

<sup>415</sup> *id.* prop. XXV.

<sup>416</sup> *id.* prop. XXIX.



phénomène de l'écho et la réflexion parabolique devrait induire une amplification des sons importante, ce que Mersenne imagine, et qu'il vérifie par expérimentation<sup>417</sup>. A de nombreuses reprises, dans *l'Harmonie Universelle*, Mersenne revient sur cette propriété de concentration des sons grâce à une surface parabolique ou elliptique, et il en tire de nombreuses applications, notamment architecturales :



Dans le quatrième livre, intitulé *De la voix*, Mersenne revient sur cette question et décrit un procédé d'amplification du son sous le titre : *Expliquer comment il faut décrire la Parabole pour ramasser les voix en un même lieu*.<sup>418</sup> Le principe trouve, bien entendu, son application dans l'acoustique des églises, afin d'entendre la voix du prédicateur en tout lieu de l'édifice.

Mersenne décrit l'utilisation de la parabole, de l'ellipse, et également de l'hyperbole qui peut également 'être grandement utile pour rendre les voix plus fortes et plus intelligibles'.

La théorie de la propagation des sons chez Mersenne est cohérente. Elle intègre correctement la notion de hauteur de son, qu'il associe, conjointement avec Galilée, au nombre de vibrations de l'air dans une unité de temps. L'intensité est liée à l'amplitude du mouvement de l'air, ce qui est conforme aux théories aristotéliennes revues par Thomas d'Aquin, et alors en vigueur. Le timbre, ou la couleur du son est associée, d'une façon un peu mystérieuse, à la configuration du mouvement de l'air, ainsi que pour la couleur des objets dans le cas de la vue. Enfin, l'analogie avec la lumière est presque complète avec les propriétés de réflexion, que Mersenne a expérimentées dans certains cas limites, la parabole, l'hyperbole et l'ellipse. Ces cas lui suffisent pour extrapoler à la configuration simple, c'est-à-dire à la réflexion sur une surface plane, qui doit nécessairement obéir aux lois de la catoptrique respectant les angles d'incidence et de réflexion. Il est pourtant clair que Mersenne, pas plus que ses contemporains ni que ses successeurs immédiats, n'a pas effectué la vérification de cette loi, sinon il aurait forcément constaté son erreur.

L'analogie entre les propagations de la lumière et des sons va donc se développer chez les quelques savants qui s'intéressent à la question, et notamment en se fondant sur les propriétés de réflexion sur les surfaces, et sur les 'observations' des phénomènes d'écho.

## Francis Bacon

A propos des propriétés de réflexion du son, Francis Bacon se fait beaucoup plus prudent que ses contemporains. L'analogie avec la réflexion dans un miroir n'est pas aussi parfaite que chez Mersenne<sup>419</sup> :

The reflexion of species visible, by mirrors, you may command; because passing in right lines, they may be guided to any point; but the reflexion of sounds is hard to master; because the sound filling great spaces in arched lines, cannot be so guided;

<sup>417</sup> Notons que cette propriété est physiquement vérifiée en ce qui concerne les miroirs paraboliques ou elliptiques (concentration du champ sonore au foyer), mais ce sont à peu près les seuls cas et ce sont des cas limites. Dans l'hypothèse d'une surface plane, du fait de la propagation sphérique, la loi de la catoptrique sur les rayons incidents et réfléchis ne s'applique pas à la propagation des sons. Par ailleurs la notion de 'rayon sonore' est impropre et induit une idée fausse de la propagation des sons.

<sup>418</sup> Mersenne, *Harmonie Universelle*, Paris, 1637 ; Paris, Ed. CNRS, 1964, Livre IV, *De la voix*, prop. XXIX à XXXI.

<sup>419</sup> Francis Bacon, *Sylva sylvarum*, 1627, ed. Spedding, London, 1859, vol II, century III, 242, p.425. Trad. Lasalle, Frantin, Dijon, 1803. Déjà cité chap. 2.

[On peut, à l'aide des miroirs, réfléchir à volonté les rayons qui s'élancent des objets visibles; et comme ces rayons jaillissent par des lignes droites qu'ils continuent de suivre, on porte où l'on veut l'image des objets. Mais on ne dispose pas aussi aisément des sons réfléchis ; parce que les sons remplissant de plus grands espaces, et se portant aussi bien en ligne courbe qu'en ligne droite, ne sont pas susceptibles de directions si précises.]

Francis Bacon a remarquablement observé que la possibilité pour le son de suivre des trajectoires 'courbes' constitue un obstacle sérieux au respect des lois de la catoptrique, et notamment de la conservation de l'intégrité du message après réflexion. Francis Bacon, décidément soucieux de l'incompatibilité de la propriété de propagation sphérique avec la réflexion de type catoptrique, poursuit<sup>420</sup> :

[...] the voice goeth round, as well towards the back as towards the front of him that speaketh [...]

[Le son direct se porte en avant, en arrière, à côté, en un mot, dans toutes les directions possibles]

Pour Bacon, c'est maintenant clair, le son direct, et réfléchi d'ailleurs, se propage de façon sphérique et non rectiligne comme celle d'un rayon lumineux.

De même Bacon réfute toute idée de réfraction des flux sonores, et donc toute possibilité d'amplification par des dispositifs équivalents à ceux des lentilles optiques<sup>421</sup>.

De façon méthodique, dans le chapitre suivant, Bacon étudie la comparaison entre son et lumière, et énumère les constatations d'usage sur l'atténuation, la sensation, la perception des couleurs et des timbres, et la sensibilité des organes. A ce sujet, il reprend la thèse aristotélicienne sur la moindre sensibilité de l'ouïe par rapport à la vue, qui prétend expliquer le retard de perception. Bacon ne craint pas ici de se contredire, puisqu'il avait longuement évoqué auparavant la vitesse du son. Il est probable que ce chapitre soit une concession aux thèses conventionnelles d'inspiration scolastique.

Toutefois Bacon introduit une différence de nature entre la lumière et le son, qui correspond à la différence d'action que les objets peuvent exercer sur l'environnement, et notamment sur les sens<sup>422</sup> :

The species of visibles seem to be emissions of beams from the objects seen ; almost like odours ; save that they are more incorporeal : but the species of audibles seem to participate more with local motion, like percussions or impressions made upon the air. So that whereas all bodies do seem to work in two maners ; either by the communication of their natures, or by the impressions or signatures of their motions. The diffusion of species visibles seemeth to participate more of the former operation, and the species audible of the latter.

[Les espèces émanées des objets visibles semblent n'être que des émissions de rayons qui s'élancent de ces objets, et avoir, à cet égard, de l'analogie avec celles qui constituent les odeurs; avec cette différence toutefois que les premières sont plus incorporelles. Mais les espèces relatives à l'ouïe participent davantage du mouvement local. Ainsi, tout corps pouvant exercer son action de deux manières; savoir : ou en communiquant sa propre nature (substance), ou en communiquant son mouvement, le premier genre d'action semble devoir être attribué aux choses visibles, et le dernier, aux choses sensibles à l'ouïe.]

Ces associations entre d'une part la lumière et la communication de substance, et d'autre part le son et la communication de mouvement est tout à fait originale

Cependant Francis Bacon insiste encore sur la différence de propagation, lignes droites pour la lumière, courbes pour le son. C'est une distinction essentielle, même si sa formulation est imprécise<sup>423</sup> :

The is one difference above all others between visibles and audibles, that is the most remarkable, as that whereupon many smaller differences do depend : namely, that visibles (except lights) are carried in right lines, and audibles in arcuate lines.

<sup>420</sup> *id.* 247, p. 426.

<sup>421</sup> *Id.* 254, p. 427. La réfraction du son a été mise en évidence au XIXème siècle, lors d'expériences particulières mettant en oeuvre l'air et un gaz confiné dans un volume fermé par une membrane susceptible de vibrer. La réfraction se produit dans la nature par exemple lorsque deux couches atmosphériques sont de densités différentes. Mais l'effet de la réfraction est insignifiant du fait de la non-directivité des flux sonores, sauf dans le cas de fréquences élevées.

<sup>422</sup> *Id.*, 268, p.430. Trad. Lasalle, Frantin, Dijon, 1803.

<sup>423</sup> *Ibidem.* 270. Trad. Lasalle.

[La différence principale et caractéristique entre les impressions des objets visibles et celles des objets sensibles à l'ouïe; différence essentielle et source de toutes les autres, est que les premières (en exceptant toutefois celles des corps lumineux) se font par des lignes droites, au lieu que les dernières se font par des lignes courbes.]

Faute d'avoir mis en évidence et appliqué cette propriété, les savants qui succéderont pendant encore un demi-siècle à Francis Bacon vont faire perdurer cette analogie spéieuse entre la propagation du son et celle de la lumière, et ce sera surtout chez les savants jésuites, nous allons tenter d'en comprendre les raisons.

## La physique des sons de Mersenne à Huygens

L'approche physique du phénomène sonore est nouvelle au début du XVII<sup>e</sup> siècle. Il a fallu dépasser les nombreuses descriptions d'échos extraordinaires pour tenter d'en comprendre le mécanisme. Il a fallu imaginer une modélisation de la perturbation reçue par l'air lors du choc sonore. Il a fallu rompre avec le dogme aristotélicien reposant sur une négation du mouvement sonore, en acceptant toutefois un mouvement d'air d'une nature imprécise, et réduisant le son à une 'qualité successive', mal décrite par l'analogie simple des 'ronds dans l'eau'. Rompre avec Aristote n'est pas chose facile et les trois savants intervenant dans le champ de la physique des sons l'entreprennent, chacun à sa manière. Francis Bacon en maniant la rhétorique, Mersenne en contournant tranquillement les thèses des Anciens, et Galilée en exprimant sa rébellion contre les 'philosophes' (*i sagaci filosofi*, ainsi les nomme-t-il dans les *Discorsi*).

Les savants de la première moitié du XVII<sup>e</sup> siècle ont bien d'autres préoccupations que la physique des sons. Roberval n'aborde quasiment pas le sujet<sup>424</sup>, Pascal, même s'il avait entrepris à l'âge de douze ans l'expérience du grincement du couteau sur une assiette, comme le rapporte sa sœur<sup>425</sup>, ne s'intéressera plus au son. Descartes, nonobstant son *Abrégé de musique*<sup>426</sup> ne traite, dans aucun de ses ouvrages, de la nature physique du son. Huygens même, pour qui peu de sujets représentaient un obstacle, aborde l'acoustique avec réticence. Musicien, il étudie les rapports harmoniques et les gammes, s'intéresse à la fréquence des vibrations sonores, mais ne publie pas sur le sujet. On sent chez le savant comme une appréhension à représenter le son, tellement fugace, tellement impalpable. A propos de la 'trompette parlante', sur laquelle l'interroge Oldenburg, Huygens conclut dubitativement<sup>427</sup> :

[...] et il faudroit auparavant avoir bien des connaissances, en ce qui concerne la nature du son et que nous n'avons pas encore.

Huygens expérimente pourtant, comme à Chantilly, à propos des échos filtrés produits par la réflexion du bruit du jet d'eau sur les marches du grand escalier.<sup>428</sup>

Après cette première phase combien nécessaire d'observations méthodique et de réfutation d'hypothèses non vérifiées, il était devenu manifeste que la compréhension du son ne se ferait pas sans une représentation cohérente de l'air, son milieu favori, et donc de la structure de la matière. C'est la raison du silence de ces savants, à part Gassendi dont l'approche 'moléculaire' de l'air permet d'aborder la propagation des sons sans appréhension.

Ce grand silence de près de cinquante ans de la part des savants non scolastiques va laisser le champ libre à un courant, qui pour n'être pas novateur, n'en est pas moins inattendu, ce sont les Jésuites post-galiléens. De Biancani à Grimaldi et Pardies, ils jouent d'abord un rôle plutôt obscurantiste, en appliquant aux sons les règles de la catoptrique, avant d'être les initiateurs inattendus de la théorie ondulatoire.

## Les Jésuites et les 'rayons sonores'

Au milieu du XVI<sup>e</sup> siècle, autour du jeune Ignace de Loyola, les membres fondateurs de la Compagnie de Jésus ont pleinement conscience de fonder une sorte d'élite intellectuelle au service de l'Eglise

<sup>424</sup> Il existe trois manuscrits de Roberval traitant de l'acoustique musicale (Gabbey), sur le diapason, les rapports harmoniques et diverses considérations sur la musique.

<sup>425</sup> Gilberte Périer (sœur de Pascal), *Vie de Pascal*, Paris : Vaton, 1845, p. 5.

<sup>426</sup> Voir supra. Rédigé à l'âge de vingt ans, le traité n'aborde que l'acoustique musicale. Il a été sorti de l'oubli par Rameau qui cherchait sans doute une caution philosophique à son *Traité d'Harmonie* en 1723.

<sup>427</sup> Christiaan Huygens, *Lettre à Oldenburg*, 13 février 1672, in Œuvres complètes, t. 7.

<sup>428</sup> Sur ce sujet, Pierre Costabel a écrit quelques pages à propos de la visite de quelques historiens des sciences à Chantilly lors d'une table ronde réunie à Pais en 1979 sur Huygens et la France. Voir l'annexe à « Huygens et la mécanique », in *Huygens et la France*, Paris, Vrin, 1982, p.149-150.

Romaine qui en avait alors bien besoin. En effet, la décadence des universités, l'ignorance de la plupart des religieux, moines ou prêtres, et surtout l'influence grandissante de la Réforme menée par d'habiles rhétoriciens ont décidé l'autorité ecclésiastique à recourir aux compétences de cette nouvelle congrégation. Parmi les missions que les Jésuites se sont attribuées au service du pape, il en est trois qui vont se développer, dès la fin du XVIème siècle, et se poursuivre durant tout le siècle suivant. Il s'agit d'abord de l'enseignement, fondé sur le dogme aristotélécien et la lecture des auteurs anciens. Puis la recherche scientifique dans les domaines des mathématiques, de la physique, et de l'astronomie avec toutefois une certaine prudence. Enfin la diffusion des connaissances, adaptée aux publics, dans le respect des dogmes édictés par l'Eglise. Grâce aux ressources et à la créativité des artistes sollicités par les Jésuites, cette mission médiatique est assurée, au moyen de procédés de manipulation et d'illusion utilisant de nombreux effets spéciaux, notamment optiques et acoustiques.

Les premières générations de savants jésuites sont constituées d'authentiques scientifiques, curieux et passionnés, avides d'en finir avec la description d'un monde statique et parfait, celle d'Aristote revue et adaptée par Thomas d'Aquin. Pourtant la hiérarchie est résolument classique et s'enferme dans cette impasse épistémologique. Ce parti pris réactionnaire est peu compréhensible, et Jean Lacouture, dans son ouvrage *Jésuites* s'interroge sur cet attachement obstiné à la pensée d'Aristote<sup>429</sup> :

Comment et pourquoi la Compagnie de Jésus, si inventive et dévote à la fois, si 'moderne' et avide d'exalter la gloire de Dieu à travers l'Evangile mais aussi la mystérieuse beauté du monde, choisit-elle de lier obstinément son char à un philosophe 'païen', génial à coup sûr, mais que près de vingt siècles et la révélation christique éloignaient de la pensée humaniste du XVIème siècle où elle avait poussé ses racines ?

Pour éviter cette impasse, les premiers savants jésuites se passionnent pour les mathématiques, moins susceptibles de confrontation avec la hiérarchie que l'astronomie, la physique ou la médecine. Un des représentants de cette génération de savants jésuites géniaux mais peu téméraires est le mathématicien Christopher Clavius.

Les élèves du Collège Romain de Rome, premier établissement d'enseignement jésuite dès 1551, étaient discrètement en admiration devant Galilée. Le procès de 1616 au cours duquel les Jésuites se sont couchés devant l'autorité, mais la soumission à l'autorité constitue leur principe fondateur, a pour longtemps enfermé la science catholique dans l'obscurantisme. Néanmoins à partir de la seconde moitié du XVIIème siècle, plusieurs savants jésuites, notamment des physiciens italiens, s'émancipent de la tutelle et prennent part aux débats scientifiques du moment. En France, le *Journal de Trévoux*, à partir de 1700, constitue une des passerelles entre la science catholique et la nouvelle science expérimentale.

En charge de la mission de propagande par les organisateurs de la Contre Réforme dès le concile de Trente, les Jésuites investissent le champ de la création artistique en incitant les peintres, les sculpteurs et les architectes à décrire la grandeur de Dieu d'une façon éclatante et conquérante. C'est le début de l'art jésuite, qu'on nommera baroque à la fin du XIXème siècle. Dans les édifices religieux, les nombreux effets spéciaux, la lumière rayonnante des peintures, les ambiances surnaturelles faisant appel à des artifices comme le trompe l'œil, sont mis en œuvre par les peintres. Au Collège de Clermont de Paris (devenu Louis le Grand), le plus grand collège jésuite de France, on présente des spectacles musicaux et des drames qui font appel à de nombreux artifices<sup>430</sup>. De même, les lanternes magiques de Kircher, et l'usage de procédés acoustiques propres à stupéfier les fidèles sont mis à contribution lors des célébrations. L'art religieux doit, selon les directives prises au concile de Trente, être porteur du message d'évangélisation auprès des illettrés, moins susceptibles de comprendre les arguments des partisans de la Réforme. Le peuple doit à la fois craindre et admirer Dieu à travers sa représentation. On utilise donc tous les procédés possibles pour créer cette ambiance et susciter vénération et effroi. Illusions, artifices, ornements, grandiloquence sont les attributs de l'art jésuite<sup>431</sup>. L'exemple le plus fameux de cet art suggestif, œuvre du peintre jésuite Pozzo, est sans aucun doute la magnifique fresque en trompe l'œil du plafond de l'église San Ignacio de Rome, qui jouxte le *Collegio Romano*. Les savants sont également mis à contribution, avec une double mission, imposer le dogme établi par la tradition scolastique, et tenter d'innover et de participer au mouvement scientifique naissant en s'appuyant sur les thèmes

<sup>429</sup> Jean Lacouture, *Jésuites*, Paris, Seuil, 1992, t. 2, p. 243.

<sup>430</sup> Marc Antoine Charpentier fut un des plus grands musiciens attachés aux Jésuites, notamment au collège de Clermont.

<sup>431</sup> A propos de la mission de l'art baroque aux XVIIème et XVIIIème siècles, on trouve ce commentaire sur le site [www.jesuites.com](http://www.jesuites.com) (site officiel de la Compagnie en 2008) : « La Compagnie de Jésus, forte de la formidable expérience reçue par Loyola, va véritablement développer une politique des images qui génèrera un élan savant de suggestions physiques et de méditations spirituelles s'adressant avec la même efficacité à la dévotion tant populaire qu'intellectuelle. »

d'immuabilité et de glorification de Dieu. Etudier la lumière fait partie de cette mission, et les Jésuites s'y emploient, avec l'aide de la géométrie qui sait si bien mettre en valeur le rayonnement et les illusions d'optique.

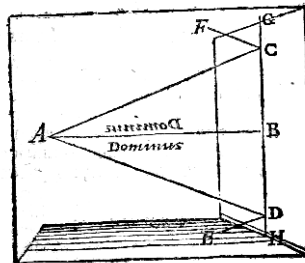
Mathématiciens avant tout, les savants jésuites géométrisent leur appréhension du monde et des phénomènes naturels. Ils assimilent très bien les lois de l'optique, même s'ils approfondissent peu le mécanisme de la vision et de la réfraction. Formatés par la méthode scolastique, ils procèdent par analogies et étudient les sensations successivement, la vue d'abord, l'ouïe ensuite. Comment ne pas, en effet, y déceler des ressemblances ?

### La réflexion des 'rayons sonores'

A partir de l'observation de la réflexion des sons dans l'écho, deux phénomènes connus se présentent à l'esprit, celui de la lumière dans un miroir, et le modèle mécanique de la balle sur un mur. Il n'est donc pas question d'envisager un modèle différent pour la propagation du son. Le modèle mécanique induit l'idée d'une nature corpusculaire de la voix. Cette approche rejoint les théories atomistes que le dogme aristotélicien refuse d'admettre. C'est pourtant l'approche de Beeckman puis de Gassendi<sup>432</sup> qui, se heurtant à de nombreux problèmes, n'aura pas grand avenir avant longtemps. Le modèle optique est plus acceptable par la physique scolastique et plus conforme au comportement du son. C'est celui qui est adopté par beaucoup de savants, et notamment par les savants jésuites. L'étude expérimentale de l'air à partir de 1660, et l'acceptation de la notion de vide qui permet l'introduction des concepts d'élasticité et de compressibilité vont alors bouleverser la théorie de propagation des sons selon le modèle optique, le modèle corpusculaire étant abandonné<sup>433</sup>.

### Biancani (1566-1624) : les miroirs sonores

Giuseppe Biancani (1566-1624) est un mathématicien et astronome de Bologne, jésuite et contemporain de Galilée. Aristotélicien et partisan du géocentrisme, il publie, après le procès de Galilée de 1616, un ouvrage important, *Sphaera mundi*, dans lequel il traite de mathématique, de géographie, d'astronomie et d'échométrie, c'est-à-dire l'étude de l'écho et des rayons sonores. Pour Biancani, le monde, créé par Dieu, est forcément parfait, et, par exemple, les montagnes terrestres s'équilibrent par les fosses des océans. Dans cet univers ordonné et hiérarchisé, le son se propage sous forme de rayons, comme la lumière, et obéit aux mêmes lois de réflexion et de réfraction<sup>434</sup>.



Pour Biancani, il est clair que, le son se propageant comme la lumière, la 'ligne sonore' AC se réfléchit en F.

Biancani était un savant réputé et très lu dans les collèges jésuites, et son autorité n'était pas à mettre en doute. Son ouvrage *Sphaera Mundi* est écrit en 1616, mais ne paraît qu'en 1620, après agrément par la Congrégation de l'Index. En effet, son premier livre, *Aristotelis loco mathematico* avait subi la censure en raison de la publication de thèses jugées galiléennes, notamment sur les corps flottants. Cependant, il semble que l'Eglise ait décidé de s'attacher cet éminent mathématicien, et sa proximité avec Grienberger a dû sans doute jouer un rôle dans ce rapprochement. L'Eglise avait alors besoin d'une Science compatible avec la religion, et cette période troublée ne favorisait pas l'attraction des savants vers cette vision du monde qu'ils estimaient dépassée. Jésuite avant tout, Biancani obéit à son ordre et au pape, selon le fameux précepte « *perinde ac*

<sup>432</sup> P. Gassendi, *Opera omnia*, t. 2, lib. VII, sectio III, cap. IV, de autitu et auditione, Lyon, Anisson, 1658, p. 361-369.

<sup>433</sup> L'approche corpusculaire de la propagation du son réapparaît vers 1730 avec Dortous de Mairan.

<sup>434</sup> Giuseppe Biancani, *Sphaera mundi, seu cosmographia demonstrativa, ac facili methodo tradita.*, Bologne, 1620, p. 221.

cadaver»<sup>435</sup>. Néanmoins Biancani accompagne le titre de son ouvrage, *sphaera mundi*, d'une distinction envers « Tycho, Kepler, Galilei, Copernic, et d'autres. » Biancani fait preuve ici d'une singulière rébellion...

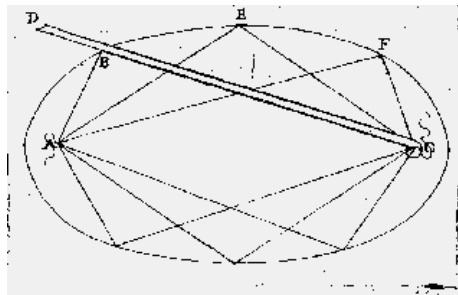
Vers la fin du traité *Echometria*, Biancani fait état d'un miroir elliptique dont son confrère Grienberger aurait commandé la construction, afin de prouver les lois de réflexion identiques des rayons lumineux et sonores.

Mersenne, qui n'étant pourtant pas jésuite avait sans doute lu l'*Echometria* de Biancani, avait ouvert la voie, en extrapolant, à partir de l'observation de l'écho, les propriétés de réflexion des sons dans certains cas particuliers comme les surfaces elliptiques. En effet, le son se comportant comme la lumière dans ces cas particuliers, il était donc naturel qu'il se comportât de la même façon dans le cas général. Les successeurs jésuites de Biancani et de Mersenne vont alors représenter ces rayons sonores qui émanent de la source vers les auditeurs, forcément passifs et immobiles, fidèles recevant la parole divine du prédicateur. Le modèle est identique à celui des rayons de lumière qui émanent de la représentation de Dieu pour venir illuminer le monde.

### Bettini (1582-1657) : la focalisation des sons

Bettini (1582-1657) est un autre savant jésuite de Bologne, mathématicien et astronome, légèrement postérieur à Biancani. Il est l'auteur d'une encyclopédie des mathématiques parue en 1642 qui figure dans toutes les bonnes bibliothèques des collèges jésuites, l'*Apiaria universae philosophiae mathematicae*. Il collabore, pour cet ouvrage avec Grienberger, professeur de mathématiques éminent au Collège Romain. Un chapitre est consacré à la 'sonométrie', ou étude des sons, en complément du chapitre sur la musique<sup>436</sup>.

Reprenant la théorie de Biancani, ainsi sans doute que les exposés de Mersenne sur les réflexions sur des surfaces courbes, Bettini entreprend d'imaginer des instruments destinés à focaliser les rayons sonores. On sait que ce procédé a été utilisé en architecture pour créer des effets spéciaux d'acoustique.



Sur ce dessin, on représente un tube dans lequel on peut parler, et dont l'extrémité est dirigée à l'un des foyers de l'ellipse de révolution. Alors Bettini affirme qu'à l'autre foyer le son sera amplifié<sup>437</sup>.

Bettini imagine alors de construire un instrument de communication à distance de forme ellipsoïde :

<sup>435</sup> Cette célèbre formule, 'obéir comme un cadavre' a longtemps été attribuée à Ignace de Loyola pour décrire l'obéissance aveugle des Jésuites.

<sup>436</sup> Mario Bettini, *Apiaria universae philosophiae mathematicae*, Bologne, 1642, *Apiarium decimum*, p. 35-43.

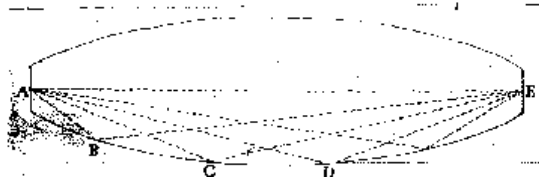
<sup>437</sup> Ce qui n'est pas faux : la focalisation des flux sonores accroît l'intensité au second foyer, il s'agit d'un cas limite qui a permis une extrapolation facile à partir des lois de la catoptrique. Notons qu'il s'agit ici de 'flux sonores' de forme ovoïde ou cardioïde, dont la relative directivité est fonction de la fréquence et de la surface de la source sonore. En aucun cas nous ne pouvons parler de 'rayons sonores' qui supposent une propagation en plusieurs lignes droites divergentes d'énergie égale. Néanmoins, la convergence de plusieurs 'flux sonores' directs en un point focal (ellipse ou parabole) permet une amplification du son suffisante pour être remarquée. Il s'agit d'un cas limite.

III. Quod instrumentum non minori cum facilitate, quam alij cylindrici tubi potest circumferri, & ori loquentis, auri audientis accommodari. Vtrilibet igitur equali foramini, velut in approposita 3 figura vel ipsi A, vel ipsi E os loquentis, & auris audientis applicentur, vox tanquam à duobus centris partim per directas lineas, ut per lineâ AE, partim per reflexas, ut per ABE, ACH,

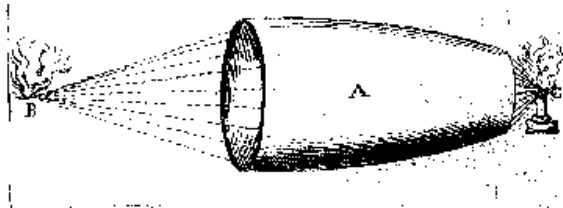
ADE

ADE vltro, citroq; ad opposita puncta A, E deferretur, ita ut nullum sit punctum futurum in tota tubi capitate, à quo vox ab vno puncto, verbi gratia ab A emissâ non reflectatur ad vnum, & oppositum punctum E, cui auris applicata perfectissimè percipiat quicquid ab altero etiam submissè proferatur.

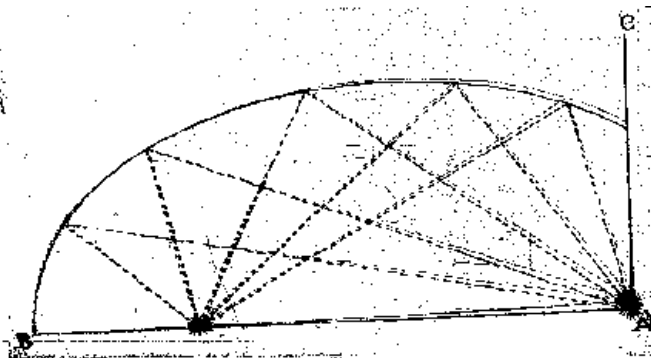
IV. De-



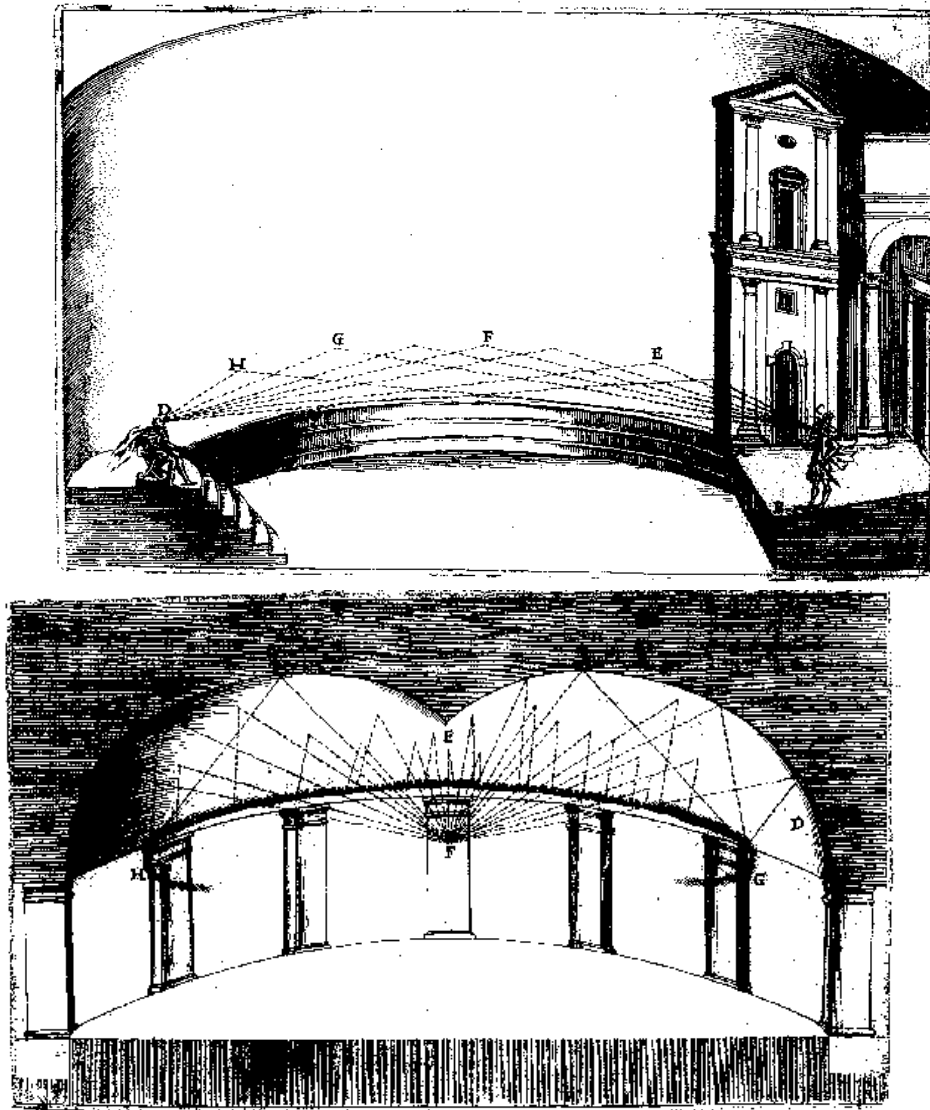
Dans sa version améliorée, en tronquant le volume, Bettini invente avant l'heure le cornet acoustique et le porte-voix. Il sera d'ailleurs abondamment copié par Kircher quelques années plus tard. Cette version, catoptrique, est destinée à enflammer à distance selon le principe des miroirs ardents, mais Bettini envisage le même procédé pour amplifier les sons :



Et Bettini, qui avait pratiqué le théâtre dans le cadre de son enseignement, imagine également des édifices adaptés à l'audition des orateurs, théâtres ou lieux de cultes, toujours en invoquant des voûtes en forme d'ellipse :



La scène est située à droite du schéma, un mur la limite et renvoie le son, comme dans les théâtres antiques, et la voute au-dessus du public, est de forme elliptique, ce qui permet à l'auditeur placé au point focal gauche d'entendre parfaitement ce qui se dit sur scène.



Ces projets n'ont pas été suivis de réalisations, mais on connaît l'influence que ces dessins, dans lesquels les rayons sonores sont partout présents, ont pu exercer, notamment sur les architectes, jusqu'à une période récente.

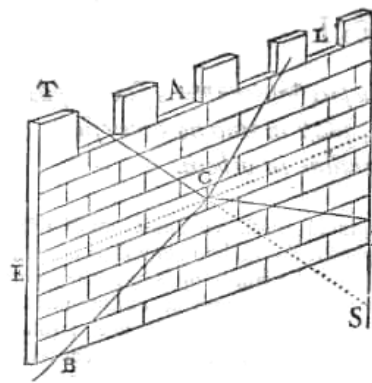
### Athanasius Kircher (1602-1680) : les rayons sonores

Kircher, jésuite érudit pratiquant plusieurs langues anciennes, écrit de nombreux ouvrages savants sur des sujets aussi différents que l'optique, le magnétisme, la musique, l'égyptologie, la géologie et la cosmologie. Il se présente comme un spécialiste de la catoptrique, et publie en 1646 un ouvrage sur la lumière et l'optique géométrique, *Ars magna lucis et umbrae*, dans lequel il propose quelques applications comme l'ancêtre de la lanterne magique. Kircher évite la voie expérimentale, et, bien qu'ayant vécu de longues années en Italie, il ne cherche pas à rencontrer les disciples de Galilée ni les savants qui défendent les nouvelles approches de la science. Il ignore Descartes, mais a lu Mersenne et bien entendu Biancani et Bettini, et se fourvoie dans de laborieuses explications sur la catoptrique. Admirateur des Anciens et résolument opposé à toute contestation du dogme, il se réfugie dans une approche ésotérique des sciences.

Dès 1646, Kircher écrit *Ars magna lucis et umbrae*, dont le thème est la lumière et les applications artificielles qu'elle peut susciter, par exemple l'invention de ce qu'on considère comme l'ancêtre de la lanterne magique<sup>438</sup>. Il y évoque également la propagation des sons, fondée sur la propriété commune de réflexion. Reprenant la théorie de Biancani, il explique l'écho par des réflexions sur les parois selon la loi de l'égalité des angles de réflexion et d'incidence.

<sup>438</sup> A. Kircher, *Ars magna lucis et umbrae*, 1646, lib. II, pars I, cap. VI et VII, p. 131-146.





reflexionis, in C, igitur illa vox redi-  
bit in D, ergo si ibi constitatur auris  
vocem ex B. radiantem in D. percipiet:  
reuertatur autem vox nō in D, sed in S,  
per impossibile: quoniam igitur angu-  
lus FCS, continet angulum FCD, erit  
vtique illo maior; ergo & maior angulo  
incidentiæ ECB, quē æqualem angulo  
ECD, reflexionis supponimus. Erit  
ergo angulus incidentiæ æqualis angulo  
reflexionis, & non erit: vox quoque  
audietur in S, & non audietur, quæ sunt  
absurda; non igitur reuerberabitur in S,  
sed in D, sub eodem angulo, sub quo  
profluxerat ex B, quod erat demon-  
strandum.

Comme on le lit, Le son émit en B se réfléchit en D, et en S on n'entend rien. Kircher était un expérimentateur approximatif.

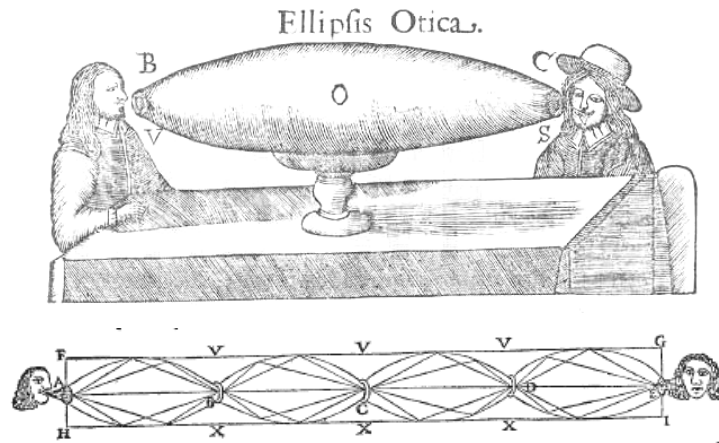
Convaincu donc que la propagation du son obéit aux mêmes lois que celles de la lumière, il développe cette approche en 1650 dans *Musurgia universalis*<sup>439</sup>, volumineux ouvrage consacré à tout ce qui concerne la musique. Il y décrit longuement les phénomènes naturels d'écho en appliquant rigoureusement les lois de la réflexion de la lumière, et en déduit la conception d'un certain nombre de dispositifs destinés à transmettre le son dans différents cas. Ces études, très largement inspirées par Bettini, sont accompagnées de magnifiques dessins mettant en scène des personnages dans des décors fantastiques. La plupart des 'expériences' de Kircher n'ont probablement pas été réalisées, même s'il a fait fabriquer de nombreux dispositifs. Cependant l'abondante iconographie qui ponctue ses ouvrages est très persuasive. L'influence de Kircher par ses dessins perdure longtemps, et il n'est pas rare d'en trouver dans des ouvrages d'acoustique jusqu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle pour illustrer les explications de l'écho.

En 1673 Kircher publie *Phonurgia*<sup>440</sup>, dans laquelle il reprend l'ensemble de ses théories sur les réflexions des sons et les développe dans cet ouvrage entièrement consacré à la question, qu'il nomme la phonocamptique (*phonocamptica*). Il y expose largement la théorie des 'rayons sonores' qui obéissent aux mêmes lois que celles de l'optique. Bien entendu, la propagation du son obéit en partie à la loi de réflexion, mais l'écho n'étant pas systématiquement observé, comme Francis Bacon et Mersenne l'avaient relevé, cela aurait dû pousser Kircher à la prudence. Il décrit longuement, avec de nombreuses illustrations, des phénomènes d'écho naturels soigneusement recensés dans différents pays, mais il est incapable d'énoncer clairement les conditions qui permettraient la réalisation d'un écho artificiel. A partir de son hypothèse construite sur une comparaison supposée parfaite, et non sur des observations rigoureuses, le raisonnement déductif l'emporte et ignore les nombreuses constatations faites auparavant par d'autres savants que Kircher ne cite jamais (sauf Mersenne ici ou là), et notamment par Francis Bacon, que tous les savants européens avaient lu.

Encouragé par sa construction théorique et par les inventions réalisées un peu partout, Kircher propose de curieux appareils pour communiquer, capter les sons ou les amplifier. Il étudie également l'acoustique architecturale et l'effet des voûtes de différentes formes (ellipses, paraboles...) sur la propagation des sons. Ayant constaté à la suite de Bettini et de Mersenne que les sons se focalisent, comme les rayons lumineux, aux foyers d'un volume ellipsoïdal, il propose un instrument de communication utilisant un tel volume, puis un autre composé de plusieurs de ces volumes disposés en ligne :

<sup>439</sup> A. Kircher, *Musurgia universalis sive ars magna consoni et dissoni*, Rome, 1650, liber IX, 'Magia phonocamptica', tome 2, p 237-308.

<sup>440</sup> A. Kircher, *Phonurgia nova*, Kempten, 1673.



L'appareil fonctionne de la manière suivante : compte tenu de la loi de concentration des rayons émis d'un foyer dans l'autre foyer d'un volume ellipsoïdal, on propose démettre les rayons sonores au premier foyer. Ceux-ci se concentrent au second foyer sans atténuation, ce qui ne veut pas dire qu'ils sont amplifiés. A ce point, soit on écoute, soit on dispose un appareil identique, suivi lui-même d'autres, et ainsi on crée une chaîne d'ellipses qui conservent l'énergie sonore le long du parcours.

La précision requise pour obtenir une certaine efficacité de cette invention la rendait pratiquement irréalisable. Cependant il se peut qu'un tel appareil se comporte en effet comme un bon instrument de communication, et sans doute sans même lui donner ces formes ellipsoïdales mais en utilisant un simple tuyau. La pratique était fréquente depuis longtemps dans l'architecture, Alberti la propose<sup>441</sup>, Della Porta en parle dans la *Magia naturalis* de 1589<sup>442</sup> et Beeckman développe le sujet. L'idée est reprise à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, c'est ce qu'on appellera les 'tubes acoustiques' qui équipent alors de nombreuses maisons bourgeoises<sup>443</sup>. En effet, depuis longtemps on sait que la propagation du son dans un tube représente un cas limite de la propagation sphérique, et que la surface de pression est assimilable à un plan. Dans ces conditions l'atténuation est presque nulle et le son se propage à grande distance, avec toutefois une déformation importante du timbre due à l'effet filtrant du tube<sup>444</sup>.

L'autorité de Kircher dans le domaine de cette acoustique naissante est largement établie et dépasse le cadre de l'enseignement jésuite. Ses nombreux et volumineux ouvrages inspirent le respect. Ils bénéficient par ailleurs de tirages importants. La théorie de la réflexion présente une simplicité apparente et elle séduit le lecteur moyen, peu habitué aux abstractions des théories ondulatoires qui apparaissent en cette fin du XVII<sup>e</sup> siècle.

<sup>441</sup> Alberti, *De re aedificatoria*, 1485, trad. franç. 1553, Livre V, chap 3, p 79 :

[...]Or ie ne veuil en cest endroit oublier a dire, que dedans l'espoisseur des murailles d'iceluy Tyran se peuvent (a cautelle) cacher certains tuyaux par lesquelz en mettant l'oreille contre, il puisse entendre a son plaisir, tout ce que diront ses domestiques, ou les survenuz la dedans.[...]

<sup>442</sup> Giambattista Della Porta, *Magiae naturalis libri XX*, Naples, 1589, livre XVI, chap. 12, p. 257.

<sup>443</sup> Les tubes acoustiques ont probablement été popularisés à la suite d'un texte qui a bénéficié d'un rapport de Condorcet et Milly à l'Académie Royale des Sciences en juin 1782, et publié en 1783 :

Dom Gauthey, *Expériences sur la propagation du son et de la voix dans des tuyaux prolongés à une grande distance*, Prault, Paris, 1783.

<sup>444</sup> La représentation spectrale du signal sonore par la transformée de Fourier (FFT) permet de comprendre aisément comment l'énergie du signal s'accroît au détriment de la bande passante. Ce qui s'observe lors de la propagation du son dans un tube qui constitue un cas limite.

De même, dans un autre cas limite, la configuration d'une surface ellipsoïde ou parabolicoïde permet la focalisation des flux sonores aux foyers, et la concentration de l'énergie acoustique. C'est l'exploitation de ce cas limite qui a entraîné les tenants des 'rayons sonores' à développer leurs théories et à se fourvoyer dans l'analogie trompeuse avec la propagation de la lumière. Le cas général obéit à des lois tout autres et la réflexion des sons, très différente de celle de la lumière, est un phénomène complexe qu'il est difficile de modéliser sans le recours au calcul différentiel.

## Les Jésuites devenus Hommes de Science après 1660

Les Jésuites 'Kirchériens' développaient une physique des sons d'inspiration mystique. Cette approche permettait un enseignement sans doute plus facilement assimilable par des élèves qui devaient avant tout se référer aux textes anciens, et surtout selon une appréhension qui devait susciter la crainte de Dieu. Le modèle des rayons sonores était bien adapté à ces objectifs, même s'il était nécessairement en contradiction avec les faits observés.

La mission d'enseignement d'une science catholique confiée aux Jésuites se complète inévitablement par une production scientifique et par des recherches, expérimentales cette fois, menées par des Jésuites, italiens pour la plupart, et un peu en marge du dogme établi par le Saint Office. La question du géocentrisme – on comprend mal encore la raison qui a poussé les Jésuites à s'y soumettre – restait présente au sein de cette petite communauté de savants et retarde leur travail de recherche. Néanmoins, la question de l'atomisme, du matérialisme et de l'existence du vide qu'elle suppose, demeure la théorie diabolique, notamment à cause du refus de la trans-substantialité que cette théorie induit. Finalement les Jésuites sont prêts à beaucoup de concessions sur le plan scientifique, si cette dernière réserve est respectée.

Cette tradition de production scientifique jésuite s'établit principalement autour de la ville de Bologne. Biancani était l'élève de Clavius et avait gardé le contact avec Galilée, malgré son opposition à l'héliocentrisme. Bettini fut l'élève de Biancani, ainsi que Riccioli dont les travaux en astronomie et en physique ont été essentiels. Riccioli avait repris les études de Galilée sur le pendule, en comptant les oscillations sur des longues durées. C'est autour de Riccioli que se forme vers 1640 une nouvelle génération de savants jésuites qui avaient lu Descartes, Roberval et Gassendi. Ce sont principalement Grimaldi, Casati et Bartoli, qui inspireront vingt ans plus tard Fabri, Pardies, Ango et Lana Terzi.

Cette nouvelle génération, moins mystique et moins préoccupée de pédagogie théologique, admet les limites de la science aristotélicienne et des conséquences incompatibles avec l'expérience. Le problème du vide, mis en évidence au cours des années 1650, joue un rôle important dans cette mutation en induisant la question de la structure de la matière. Leur tâche scientifique s'avère complexe, car souvent soupçonnés d'héliocentrisme, ces Jésuites ont eu de fréquents problèmes avec les autorités ecclésiastiques et leurs publications sont étroitement surveillées.

Les recherches de Grimaldi, de Bartoli, de Pardies et d'Ango ont permis à Huygens d'élaborer sa théorie ondulatoire de la lumière. Les textes écrits par ces savants à cette occasion comprennent tous une partie consacrée à la propagation des sons, domaine largement ignoré des physiciens de l'époque. On y trouve notamment la célèbre analogie des 'ronds dans l'eau', qui constitue un modèle acceptable puisque développé par Thomas d'Aquin, habile synthèse entre les Pères de l'Eglise et la physique moderne.

### Francesco Maria Grimaldi (1618-1663)

Riccioli et Casati n'abordent pas la propagation des sons. Le premier est avant tout un astronome, et dans son *Almageste* de 1651<sup>445</sup>, seule l'harmonie est longuement développée, avec des comparaisons entre les différents systèmes et une analyse de la théorie de Képler sur l'harmonie des sphères. Casati est surtout un mathématicien préoccupé de mécanique (*mechanicorum libri octo*). On lui doit cependant un court traité sur la 'tromba parlante' (porte-voix) en 1673, sujet très en vogue ces années là<sup>446</sup>.

Grimaldi (1618-1663) est astronome, collaborateur de Riccioli, et physicien. Il est surtout connu pour sa théorie de la diffraction de la lumière, développée dans un ouvrage posthume, *Physicomathesis de lumine* paru en 1665<sup>447</sup>. Il est sans doute le premier, dans la tradition de la science jésuite, à s'opposer à la théorie des 'rayons sonores'.

Dans cet ouvrage, il s'attarde longuement sur la propagation des sons, pour la comparer à celle de la lumière. Il y développe la théorie des ondes, inspirée par la célèbre analogie des ronds dans l'eau<sup>448</sup>. On remarque le cheminement de la pensée de Grimaldi. La modélisation de la propagation du son grâce à l'analogie des 'ronds dans l'eau' permet d'initier la modélisation ondulatoire de la propagation de la lumière, objectif principal de son ouvrage.

<sup>445</sup> Jean Baptiste Riccioli, *Almagestum novum*, Bologne, 1651.

<sup>446</sup> Paolo Casati, *la tromba parlante*, Parme, 1673.

<sup>447</sup> Francesco Maria Grimaldi, *Physicomathesis de lumine, coloribus, et iride, aliisque annexis*, Bologne, 1665.

<sup>448</sup> *idem*. prop. XLIV, p. 370-395.

## Honoré Fabri (1607-1688)

Honoré Fabri est un Jésuite atypique originaire de Lyon. Formé au Collège Romain, il a pu y rencontrer Kircher. Admirateur de Galilée, il devient adepte de l'héliocentrisme, et se réclame volontiers de Descartes, ce qui lui vaut quelques ennuis avec la hiérarchie. Il est en correspondance avec Mersenne, puis avec le jeune Leibniz et Huygens. On lui doit, sous différents noms, de nombreux ouvrages de logique, de théologie et de mathématiques.

Fabri aborde la propagation des sons dans un livre didactique en quatre volumes, réédité à de nombreuses reprises, *Physica, id est, Scientia rerum corporearum*, paru pour la première fois en 1669. La partie concernant le son est importante, plus de 200 pages, et Fabri aborde tous les aspects du sujet. La comparaison entre le son et la lumière est évoquée à propos de la production de l'écho. Fabri pose comme hypothèse, pour mieux la réfuter, que le son se propage et se réfléchit comme la lumière, thèse défendue par Kircher. Alors le comportement des rayons sonores doit être identique lors d'utilisation de miroirs acoustiques, notamment de forme parabolique, ellipsoïde, ou plan. Fabri examine ces différents cas, et en conclut qu'il devrait alors y avoir production d'un écho, analogue au comportement de la lumière dans ces différentes situations. Or ce n'est pas le cas, il le vérifie par expérience, dans le cas d'une surface plane. Donc le son ne se propage pas et ne se réfléchit pas comme la lumière<sup>449</sup> :

Proposition 185 : Le son ne se réfléchit pas comme la lumière. C'est vérifié, parce que, s'il se réfléchissait comme la lumière, tous les genres de miroirs placés à distance convenable feraient un écho, selon les prop. 181, 182, 183. Mais aucun genre de miroir ne produit d'écho, d'après la prop. 184. Donc le son ne se réfléchit pas comme la lumière.

Le raisonnement manque un peu de solidité, mais Fabri expose ensuite sa théorie de la propagation du son, inspirée par Grimaldi :

La raison en est que, d'abord le son se diffuse de façon successive, la lumière de façon instantanée. Celui-là par le mouvement des corps, celle-ci sans mouvement local, par pure diffusion de qualité. [le son se propage] par ondulations (comme je l'ai dit), c'est-à-dire qu'à une onde succède une onde, séparées bien entendu par un court délai, voire même en totalité dans le même temps.

On sent plus de conviction que de rigueur dans ce passage, mais Fabri se pose définitivement en adversaire de Kircher, qui n'avait pas de leçon de rigueur à donner avec ses rayons sonores.. Les propositions 181 à 183 auxquelles Fabri fait référence décrivent des configurations avec des miroirs acoustiques parabolique, ellipsoïde et plan. La proposition 184 est une affirmation un peu péremptoire sur l'impossibilité de produire un écho dans de tels cas. Pour Fabri, c'est l'occasion ici de développer la théorie ondulatoire de la propagation des sons, qui sera débattue et affinée dans les décennies suivantes.

Avec Grimaldi et Fabri, on est au commencement d'une mutation qui, conjointement avec les travaux de Boyle et de Mariotte sur la compressibilité et l'élasticité de l'air, vont conduire à une représentation des sons totalement nouvelle.

## Lana Terzi (1631-1687)

Francesco Lana Terzi (1631-1687) est un Jésuite de Brescia, ancien élève de Kircher au Collège Romain, vers 1655. Esprit pratique plus que théoricien, il est le concepteur de plusieurs inventions, et adepte de l'alchimie. Correspondant de la Royal Society en 1671, il enseigne les mathématiques à Ferrare à partir de 1677 et écrit un ouvrage réédité de nombreuses fois, *Magisterium naturae et artis*<sup>450</sup>. Le livre X, *De sono*, est un long exposé, près d'une centaine de pages, des théories sur le son du point de vue physique. Le traité commence par une description de différentes expériences concernant le son et d'observations sur le phénomène de l'écho. Vient ensuite un développement des thèses aristotéliennes, inspiré par le chapitre 8 du livre II du *De anima*, par le *De audibilibus* et par la section XI des *Problemata*. Comme les Scolastiques, Lana Terzi parle du son en acte et en puissance, du mouvement du corps sonore lors d'un son en acte, du son comme mouvement en tant que changement de qualité, de l'insuffisance du mouvement pour produire un son. Puis il évoque le mouvement vibratoire du corps sonore et des parties de l'air qui propage le son, ainsi que l'atténuation liée à la distance. Il étudie ensuite la hauteur, l'intensité et la durée des sons. Vient enfin la question de la réflexion et de l'écho. Après une concession (proposition 37) aux travaux de son maître Kircher sur les possibilités de réaliser, dans le cas de réflexions sonores selon les lois de la catoptrique, de "nombreuses inventions brillantes et profitables à la pratique" ("*multae inventiones praeclarae et utiles ad praxim*"), il procède à une critique en règle de cette

<sup>449</sup> Honoré Fabri, *Physica, id est, Scientia rerum corporearum*, Lyon, Anisson, 1670, propositions 181 à 187, p. 193-196. Traduction par mes soins.

<sup>450</sup> F. Lana Terzi, *magisterium naturae et artis, opus physico mathematicum*, Brescia, 1684, 1686.

théorie. La proposition 38 a pour titre "l'écho ne se fait pas par une simple réflexion de la voix" ("*Echo non fit per simplicem vocis reflexionem*"). Lana Terzi développe alors une argumentation inspirée de Fabri sur la réflexion des sons sur un mur plan. Si la réflexion d'un 'rayon sonore' oblique par rapport au mur se fait selon la loi de l'égalité des angles d'incidence et de réflexion, on ne devrait rien entendre à une position située, par exemple, sur la perpendiculaire au mur. Or l'expérience montre facilement la fausseté de cette affirmation. Cette proposition se termine par des propos plutôt désobligeants vis à vis des partisans de l'analogie entre propagations du son et de la lumière, Kircher notamment. La proposition 39 peut alors s'intituler "le son ne se réfléchit pas selon le mode de la lumière" ("*Sonus non reflectitur ad modum luminis*"). Cette phrase est une réponse cinglante au « *sonus lucis simia est* » que Kircher, alors décédé depuis peu, martèle au long de sa *Phonurgia* parue quelque dix ans plus tôt. Contre le courant jésuite germanique, le latin Lana Terzi explique que le son ne se propage pas en lignes droites comme la lumière, mais de façon circulaire à partir de sa source, et il reprend alors l'analogie ondulatoire des ronds dans l'eau. Le respect des dogmes établis par les Docteurs de l'Eglise était sauvegardé, malgré l'opposition aux thèses de Kircher. Pour des Jésuites tels que Fabri et Lana Terzi, cet aspect des choses demeure important..

### **Les savants jésuites après Kircher : des ondes de son et de lumière**

Si l'influence des catoptriciens, dont Kircher est sans doute le plus prolixe, perdure pendant longtemps, les expériences sur le vide du milieu du siècle vont permettre une orientation toute différente de l'étude de la propagation des sons. Les savants jésuites vont alors se faire un peu plus critiques et vont participer activement à l'élaboration de la physique de l'air initiée par Pascal, Boyle et Newton. Ils vont alors se tourner, pour modéliser la propagation des sons, vers une autre analogie scolastique, respectant le cadre aristotélicien, celle des 'ronds dans l'eau'. L'initiateur jésuite de ce courant novateur est Grimaldi, suivi par Pardies et Ango.

Et par un curieux effet de réciprocité, peu après l'élaboration de cette théorie presque 'ondulatoire' de la propagation des sons, Huygens, sur une idée de Pardies, énonce sa théorie ondulatoire de la lumière. On revient décidément toujours à cette comparaison indissociable de l'étude des deux principaux systèmes de perception et d'appréhension du monde qui nous entoure, la vue et l'ouïe.

### **L'analogie son et lumière à l'époque de Newton**

Vers la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle, l'influence des Jésuites tend à s'amoindrir devant les avancées de la science expérimentale alors en plein essor en France, avec l'Académie Royale des Sciences et en Angleterre avec la Royal Society. Les progrès de l'optique sont considérables depuis une trentaine d'années, ainsi que ceux de la physique de l'air, grâce à la révélation de la possibilité du vide. Les théories du son commencent à se construire autour des propriétés de l'air, et l'analogie avec la propagation de la lumière trouve ses limites. Les comparaisons entre l'optique et la physique des sons se font alors plus rares et plus spécifiques.

Le courant qui assimile les deux processus continue sur la voie ouverte par la science jésuite de Kircher, par exemple chez Narcissus Marsh, et on retrouvera ça et là cette influence pendant encore longtemps.

Grâce à l'autorité intellectuelle de Huygens, émerge alors une théorie de la lumière inspirée de la propagation ondulatoire des sons déjà initiée par Grimaldi et qui commence à s'affirmer très nettement. La comparaison entre son et lumière tend à inverser ses termes. En supposant connue et admise la propagation ondulatoire des sons, on propose une modélisation analogue pour la lumière. Pourtant la propagation ondulatoire des sons en est encore à chercher son modèle et bien des difficultés sont encore à résoudre. Mais cette représentation qui s'appuie sur l'analogie des ronds dans l'eau, ne semble plus poser de problèmes, les savants considèrent que c'est un acquis de la connaissance. Dès lors cette représentation sert elle-même de modèle pour la propagation de la lumière. Cependant, dans les deux processus, on n'est encore que dans des spéculations, des hypothèses, des représentations sans aucune loi physique établie.

Parallèlement, l'approche corpusculaire héritée de l'atomisme perdure dans l'entourage de Newton. Malgré sa description très avancée du phénomène de la propagation des sons dans les *Principia*, qui repose sur une approche pneumatique et ondulatoire, son adhésion à une certaine forme d'atomisme entraîne un certain nombre d'auteurs dans cette voie en impasse. En outre Newton propose dans son *Optique* une curieuse théorie de correspondance entre couleurs et tonalités qui provoque une certaine perplexité mêlée d'admiration chez quelques savants européens, comme Dortous de Mairan vers 1730.

### **Narcissus Marsh : le microphone et le polyphone**

Narcissus Marsh (1638-1713) a effectué une longue carrière dans l'Eglise irlandaise. Théologien érudit, heureux propriétaire d'une riche bibliothèque qu'il ouvre au public, il occupe des fonctions de direction de collège et termine sa vie comme archevêque. Sa seule contribution aux sciences est un petit traité concernant les

sons, qui paraît en entier dans les *Philosophical Transactions* en 1684, et intitulé '*Introductory Essay to the Doctrine of Sounds containing some proposals for the improvement of acousticks*'<sup>451</sup>.

S'inspirant très nettement d'Aristote et de Kircher, Marsh pose en principe le parallélisme systématique entre les lois de l'optique et celles de l'acoustique (mot qu'il est un des premiers à utiliser). Il se fonde sur la ressemblance entre la vue et l'audition, et imagine une transposition aux sons des améliorations apportées à la vision<sup>452</sup> :

La vision est triple, directe, réfractée et réfléchie, à quoi correspondent l'optique, la dioptrique et la catoptrique. De la même manière, l'audition peut être directe, réfractée et réfléchie, à quoi notre doctrine de l'acoustique fait correspondre ce que nous nommerons l'acoustique, la diacoustique et la catacoustique, ou si on veut, la phonique, la diaphonique et la cataphonique.

La suite est une dissertation très formelle et un long développement du parallèle entre les deux processus. Puisqu'il a adopté une classification en trois types de propagations, Marsh décrit les phénomènes, d'une part pour la lumière, d'autre part pour les sons. Si les sons directs ne posent pas trop de problèmes, la notion de réfraction est un peu plus floue et Marsh tente une description rigoureuse de la propagation du son dans deux milieux différents. L'idée est intéressante et sans doute personne avant lui, sauf Mersenne, ne s'était attaché à l'étude de cette propriété. Mais si Marsh est audacieux, il n'est pas expérimentateur, et son exposé n'est qu'une suite d'hypothèses et de suggestions d'inventions, comme le 'microphone', sorte d'équivalent du microscope<sup>453</sup> :

Comme les microscopes ou les verres grossissants aident l'oeil à voir de près les objets qui à cause de leur petitesse étaient invisibles auparavant, en les grossissant d'une taille étrange, de même on peut imaginer de cette manière des microphones ou micracousticks, instruments grossissant l'ouïe, de façon à rendre les sons les plus faibles distinctement audibles en grandissant leur intensité de façon inconcevable.

On pourrait grâce à ces instruments entendre les différents cris et tons comme avec un microscope permet de voir les diverses figures et formes des petits animaux.

Avec les polyscopes ou les verres multipliant, on peut voir une chose comme multiple, soit d'une même forme, soit de différentes si on met en oeuvre des verres multipliant, de même avec un polyphone, ou polyacoustick on pourra entendre un son comme plusieurs, soit de la même note soit d'une note différente. Plus encore, quelqu'un utilisant cet instrument pourra, à partir du son d'une viole, entendre un concert entier, le tout en parfaite harmonie. Ce qui donne à cet instrument plus d'avantages que le polyscope.

Tout ceci suffit pour comparer les progrès réalisés dans le domaine de la réfraction tant pour la vue que pour l'ouïe. Je l'appelle 'refracted hearing' (l'ouïe par réfraction) parce qu'elle est due au passage par un medium, l'air dense, ou un instrument, qui réfracte ou brise le son.

Néanmoins reconnaissons à Marsh l'intuition de la réfraction du son, bien réelle et mise en évidence au XIX<sup>e</sup> siècle, lorsque deux milieux différents sont juxtaposés. Bien entendu le phénomène est différent de la réfraction lumineuse et il est sans doute impossible de réaliser une amplification du son d'une manière analogue à celle des lentilles optiques.

L'exercice auquel se livre Marsh est périlleux et sa belle construction ne sera reprise par personne après la publication de son exposé. Signalons cependant une allusion à sa terminologie innovante dans l'Encyclopédie, sans doute sous l'influence de l'Anglais Chambers qui en est l'un des précurseurs<sup>454</sup>.

## Huygens : le son dans le *Traité de la lumière*

Physicien avant tout, Huygens adopte la propagation ondulatoire des sons<sup>455</sup> :

[...] on peut assez comprendre comment cecy se passe en ce qui est du son, quand on considère que l'air est de telle nature qu'il peut estre comprimé, et réduit à un espace beaucoup moindre qu'il n'occupe d'ordinaire ; et qu'à mesure qu'il est comprimé il fait effort à se remettre au large : car cela joint à sa pénétrabilité, qui luy demeure non obstant sa compression, semble prouver qu'il est fait de petits corps qui nagent et qui sont agitez fort viste dans la matière éthérée, composée de parties bien plus petites. De sorte que la cause de l'extension des ondes du son, c'est

<sup>451</sup> Narcissus Marsh, '*The doctrine of sounds...*' in Phil. Trans. 156, 1684, p 472-488.

<sup>452</sup> *Idem*, traduction personnelle, p. 473.

<sup>453</sup> *id.* p. 483.

<sup>454</sup> *Encyclopédie, ou Dictionnaire Raisonné des Sciences, des Arts et des Métiers*, Paris, 1751-1766. Voir les articles 'Acoustique' (1-111), 'Catacoustique' (2-758), 'Diacoustique' (4-931), 'Phonique' (12-523).

<sup>455</sup> Christiaan Huygens, *Traité de la lumière*, in *Oeuvres complètes*, La Haye, Nijhoff, 1937, t. 19, p. 471.

l'effort que font ces petits corps, qui s'entrechoquent, à se remettre au large, lorsqu'ils sont un peu plus serrés dans le circuit de ces ondes, qu'ailleurs.

Huygens connaît les travaux de Mariotte et de Boyle sur la pression de l'air et son élasticité, et il a maintenant une approche très claire des mouvements ondulatoires dans l'air. Il expose également une théorie de la structure de la matière, inspirée de Descartes mais compatible avec un vide qu'il nomme 'matière éthérée'. Concernant la propagation ondulatoire, il insiste bien sur la nature du mouvement, ce n'est pas la matière qui se déplace, mais ses vibrations qui se propagent<sup>456</sup> :

[...] la propagation successive des ondes n'en saurait estre empeschée, parce qu'elle ne consiste point dans le transport de ces parties, mais seulement dans un petit ébranlement, qu'elles ne peuvent s'empescher de communiquer à celles qui les environnent, non obstant tout le mouvement qui les agite et fait changer de place entr'elles.

La démarche de Huygens concernant l'analogie entre le son et la lumière est particulière. La modélisation de la propagation des sons étant établie, il se sert de ce modèle pour proposer une théorie audacieuse concernant la propagation ondulatoire de la lumière. L'analogie est ici inversée, c'est la lumière qui se propage comme le son.

Huygens n'en dira pas beaucoup plus sur la nature physique du son, mais la description qu'il fait de la propagation ondulatoire est essentielle. Une nouvelle modélisation apparaît, qui repose sur le mouvement d'ondes sans transport de matière.

En dehors de quelques textes sur l'acoustique musicale, il laissera à son ami Claude Perrault le soin de développer ce thème dans son volumineux *Traité de Physique*.

## Newton et la propagation d'un mouvement de pression

Newton est le premier physicien qui a modélisé de façon physico-mathématique la propagation des sons, en se fondant sur la propriété de compressibilité de l'air, sur l'étude de la propagation du mouvement dans les fluides et sur les lois de gravitation qu'il venait d'énoncer. Cet exposé figure dans l'étude du mouvement qui occupe le second livre des *Principia* parus en 1686<sup>457</sup>.

Deux passages de ses ouvrages traitent du rapport entre la propagation de la lumière et celle du son.

Tout d'abord Newton affirme, en titre de la proposition 41 que « la pression ne se propage point en ligne droite dans un fluide ». Et il illustre sa proposition d'un dessin très explicite qui présente deux cas. Dans l'un les parties sont alignées, et alors le mouvement de pression se fait en ligne droite, mais ce cas ne se rencontre pas pour un fluide. Dans l'autre, les parties sont situées obliquement entre elles, et le mouvement de pression se communique à toutes les parties conjointes tant qu'elle ne peuvent pas contenir la pression. :



En titre de la proposition 42 qui suit, Newton déclare :

Motus omnis per fluidem propagatus divergit a recto tramite in spatia immota.

[Tout mouvement propagé dans un fluide s'éloigne de la ligne droite dans un espace immobile.]

A cette occasion, il décrit de cette façon la propagation du son<sup>458</sup> :

Hoc experimentur in sonis, qui vel domo interposita audiuntur, vel in cubiculum per fenestram admissi sese in omnes cubiculi partes dilatant, inque angulis omnibus audiuntur, non reflexi a parietibus oppositis sed a fenestra directe propagati.

[On en fait l'expérience dans les sons qui sont entendus lorsqu'il y a une maison interposée, ou quand, entrant par la fenêtre d'une chambre, ils se dilatent dans toutes les parties de

<sup>456</sup> *Idem*, p.474.

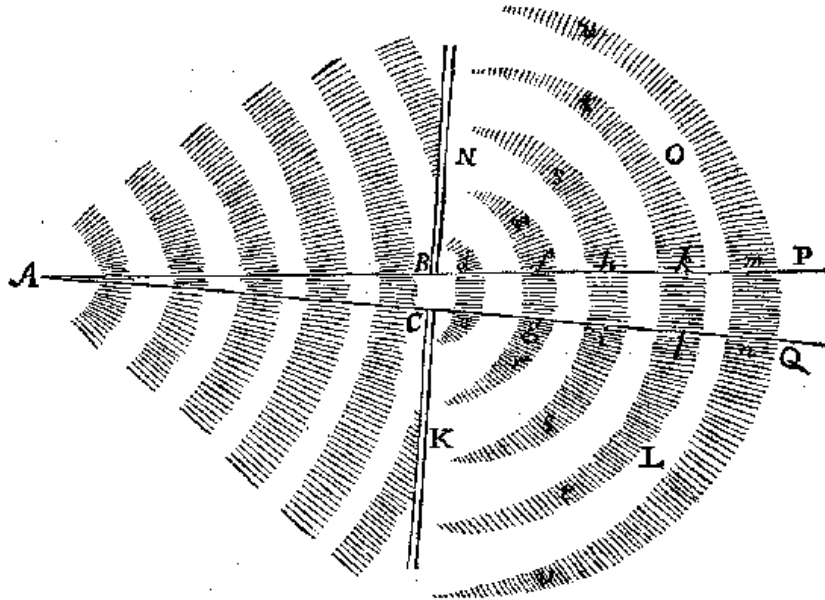
<sup>457</sup> Isaac Newton, *Philosophiae naturalis principia mathematica*, Londres, 1687, Lib II, Sect VIII, prop. 50.

<sup>458</sup> Isaac Newton, *Philosophiae naturalis principia mathematica*, Londres, 1687, Lib II, Sect VIII, prop. 42, p.358.

la pièce, et sont entendus dans tous les angles, non parce qu'ils sont réfléchis par les murs opposés, mais parce qu'ils se propagent simplement depuis la fenêtre.]

L'allusion à la réflexion sur les parois qui sont à l'origine de la diffusion en tous points de la pièce remet en question toute la théorie des 'rayons sonores' en proposant une modélisation radicalement nouvelle, celle de la propagation d'un mouvement de pression.

Newton illustre sa démonstration d'un dessin remarquable qui réfute définitivement la théorie des 'rayons sonores' et qui rencontrera pourtant un succès bien moindre que l'iconographie abondante de Kircher :



Newton présente sur ce dessin le passage à travers une ouverture pratiquée dans une paroi opaque et solide, d'un mouvement quelconque dans un milieu fluide. Le cône APQ correspond à la propagation de corps matériels suffisamment petits pour passer sans choc à travers l'ouverture, tels que pourraient l'être par exemple un flux de corpuscules (Newton ne précise pas ici que ce pourrait être des corpuscules de lumière, représenté généralement par un 'rayon', mais on peut raisonnablement le supposer). Les orbles grisées sont la représentation de la propagation du mouvement d'une pression subie par les parties du milieu fluide. Newton envisage le cas de la propagation du mouvement d'une onde dans une eau stagnante et celui de la propagation d'une compression suivie d'une détente, telle que la propagation du son dans l'air. Dans ce dernier cas qui nous intéresse, ces orbles grisées sont la représentation du champ sonore qui, lors de sa propagation, rencontre l'obstacle de la paroi. Lorsque le son s'insinue dans l'ouverture, celle-ci devient une nouvelle source sonore, et la propagation s'effectue par des hémisphères dont le centre est constitué par l'ouverture dans la paroi. Newton est très précis sur cette illustration, et, si on considère que l'épaisseur des orbles correspond à l'intensité sonore, on constate bien que, malgré la diffusion sphérique, l'intensité s'amoin-drit vers la paroi, ce qui confère à la propagation une certaine directivité, toutefois très différente de l'image de 'rayons sonores'.

### L'analogie curieuse de Newton entre les couleurs et les tons

La seconde occurrence des rapports entre son et lumière chez Newton se trouve dans son *Traité d'Optique*. Newton y fait un curieux rapprochement entre les différences de couleurs et les tons de la gamme. Il expérimente la réfraction de la lumière dans deux prismes juxtaposés séparés par une lame d'air, procédé qui permet la projection d'anneaux de couleurs sur une feuille de papier placée à proximité. Newton constate une différence de diamètres des cercles selon la couleur. Il procède à leur mesure qui est indépendante de tout autre paramètre, et analyse les rapports des diamètres des anneaux présentés par les limites des couleurs<sup>459</sup> :

[...] Il suit de là que les différentes épaisseurs de la lame d'air aux endroits où les confins des couleurs primitives produisent les anneaux, sont entre elles comme les racines cubiques des carrés des longueurs du monocorde, qui rendent ces tons de l'octave sol, la, fa, sol, la, mi, fa, sol; c'est-à-dire comme les racines cubiques des carrés des nombres 1, 8/9, 5/6, 3/4, 2/3, 3/5, 9/16, 1/2. [...]

<sup>459</sup> Isaac Newton, *Traité d'optique*, trad. franç., Paris, Leroy, 1787, t. 2, livre II, p. 25.



Ce n'est pas ici le propos de décoder ce passage, mais simplement de s'étonner d'une telle incursion de l'acoustique musicale dans une expérience d'optique. La pertinence de l'analogie entre les différences des couleurs et les rapports numériques des intervalles musicaux reste à démontrer. Cependant il n'est pas anodin d'exposer les commentaires que cette théorie ont pu suggérer quelques décennies plus tard, tant le prestige du savant était considérable. Il en est ainsi de Dortous de Mairan qui l'a largement développé en se fondant sur l'autorité de Newton.

## Conclusion

A la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle, on est donc en présence d'une théorie pneumatique, encore balbutiante, qui cherche à comprendre la propagation des sons comme le déplacement d'une variation continue d'une déformation du milieu, et à une autre théorie, d'inspiration scolastique et défendue par des savants jésuites, qui se conforme aux lois 'mécaniques' et géométriques de propagation de la lumière. La première de ces théories connaît son développement vers le milieu du XVIII<sup>ème</sup> siècle avec la mathématisation du mouvement de propagation d'une onde. Ce travail est réalisé grâce à l'étude approfondie du mouvement vibratoire, à travers la célèbre polémique des cordes vibrantes qui voit intervenir D'Alembert, Euler, Daniel Bernoulli puis Lagrange. Cette modélisation mathématique devient de plus en plus complexe à appréhender, et elle n'est comprise que par une poignée d'initiés au calcul différentiel. C'est sans doute l'inaccessibilité à cette théorie abstraite pour le grand public, même éclairé, qui explique la popularité d'une modélisation beaucoup plus simple à représenter, en particulier de façon graphique, celle des 'rayons sonores'. La représentation par les 'ronds dans l'eau', quant à elle, demeure dans les ouvrages de physique à usage scolaire, mais son statut est uniquement illustratif et permet simplement d'expliquer le sens du mot 'onde', et non la notion qui lui est associée.

## 7 - Les ronds dans l'eau

### **Introduction**

Nous l'avons vu, la modélisation de la propagation des sons dans l'air faisant appel à la progression de cercles concentriques à la surface de l'eau après qu'on y a jeté une pierre a été évoquée semble-t-il pour la première fois par les Stoïciens, notamment par Chrysippe, environ deux siècles avant notre ère. Reprise par la suite par de nombreux philosophes, elle deviendra après Thomas d'Aquin le modèle de référence de la propagation des sons.

Jusqu'au XVII<sup>ème</sup> siècle elle est adoptée par quasiment tous les physiciens, et ne sera contestée que vers 1680, mais pour la perfectionner, par l'abandon des vagues d'eau au profit d'une hypothèse fondée sur des mouvements alternatifs de parties d'air. Cependant, cette représentation, si elle est bien à l'origine de la compréhension du phénomène ondulatoire, demeure avant tout une illustration, il serait excessif d'en faire une véritable analogie.

La modélisation des ronds dans l'eau est très consensuelle. On peut dire que tous les auteurs qui, à partir du XIII<sup>ème</sup> siècle ont pu, à un moment ou à un autre, traiter de la propagation du son, ont cité cette représentation à l'appui de leur exposé. Au XVII<sup>ème</sup> siècle, alors que tous les savants se démarquent du vocabulaire et des notions scolastiques, il n'y en a que très peu qui ne citent pas cette analogie. Même les atomistes comme Gassendi la reprennent alors que la théorie du bombardement de corpuscules s'accommode mal de ces cercles tranquilles. Quelques-uns, comme Mersenne, puis Perrault cherchent à approfondir le modèle pour finalement le rejeter en partie, mais sans polémique. On trouve également d'autres représentations aquatiques, comme le verre rempli d'eau sur lequel on passe un doigt ou un archet. Cette dernière expérience va subir des avatars car certains lecteurs du XX<sup>ème</sup> siècle ont mal compris cette expérience.

Quoi qu'il en soit, cette analogie est fructueuse, elle est à l'origine du terme 'onde', en anglais 'wave', ce qui est encore plus explicite. La modélisation des ronds dans l'eau, ne serait-ce que par le vocabulaire dont la science des phénomènes vibratoires s'est emparée, voit son avenir sans aucun doute assuré.



## Les origines de l'analogie des ronds dans l'eau

### Les Stoïciens

On doit à Diogène Laërce la citation de cette phrase du philosophe stoïcien Chrysippe qui serait extraite d'un traité de physique non retrouvé<sup>460</sup> :

On entend quand l'air placé entre celui qui parle et celui qui écoute est ébranlé en cercles concentriques et vient frapper les oreilles, comme l'eau d'une citerne est agitée d'ondes concentriques quand on y jette une pierre.

On notera que le doxographe cite Chrysippe (*Physique, livre II*) dans le chapitre consacré au stoïcien Zénon.

Pierre Costabel dit<sup>461</sup>, sans citer sa source, que Héron d'Alexandrie connaissait la nature ondulatoire du son dans l'air. On trouve en effet une phrase, dans *De speculis* qui semble aller dans ce sens<sup>462</sup> :

Pulsa chorda fluctuantem intelligimus aerem.

[la corde étant frappée, nous représentons l'air agité comme de l'eau.]

Au cours des premiers siècles de notre ère le modèle se répand, chez Plutarque et surtout dans le Traité d'Architecture de Vitruve. Les Stoïciens dont s'inspirent ces auteurs, refusaient de concevoir l'air comme un ensemble de molécules dispersées dans le vide, thèse défendue par les Epicuriens. Pour les Stoïciens, l'air est une matière continue éventuellement disposée à se mouvoir, ce qui était également l'approche d'Aristote et de son Ecole. La pensée scientifique chrétienne, qui refuse l'idée de vide, reprendra cette conception. Il était donc nécessaire d'émettre une hypothèse quant à la nature du mouvement d'air correspondant à la propagation des sons. L'inspiration est aristotélécienne mais plus précise car elle permet de justifier la réflexion sur les obstacles ainsi que la superposition des sons et le temps de propagation. L'intensité et son affaiblissement sont également décrits par cette modélisation. En revanche, elle explique mal la nature particulière de ce type de mouvement sans transport de matière, mais illustre, sur un mode pédagogique, le phénomène de la propagation du son.

### Vitruve : Le livre V du *De architectura*

Vitruve, au Ier siècle av. J-C, écrit un célèbre traité d'architecture, sans doute sa seule œuvre. Dans cet ouvrage constitué de dix livres, Vitruve aborde la construction et l'aménagement des lieux publics, et notamment des lieux de spectacle, les théâtres. Il s'agit du livre V, à partir du chapitre 3. De façon très pédagogique, et comme l'acoustique est importante dans les lieux scéniques, Vitruve commence par expliquer comment le son se propage, puis il traite longuement de l'harmonie, ce qui peut sembler insolite, mais qui trouve son explication dans le chapitre suivant où il expose la théorie des vases acoustiques en usage dans les théâtres grecs et romains. Voici comment Vitruve expose sa théorie de la propagations des sons :

6. vox autem est spiritus fluens aeris, et ictu sensibilis auditui, ea movetur circulorum rotundationibus infinitis, uti si in stantem aquam lapide immissio nascantur innumerabiles undarum circuli crescentes a centro quam latissime possunt evagantes, nisi angustia loci interpellaverit aut aliqua offensio, quae non patitur designationes earum undarum ad exitus pervenire. Itaque quum interpellentur offensionibus, primae redundantes insequentium disturbant designationes.

7. eadem ratione vox ictu ad circumum efficit motiones, sed in aqua circuli planitie in latitudinem moventur ; vox et in latitudine progreditur, et altitudinem gradatim scandit. Igitur ut in aqua undarum designationibus, ita in voce cum offensio nulla primam undam interpellaverit, non disturbat secundam nec insequentem, sed omnes sine resonantia perveniunt ad imorum et ad summorum aures.

Traduction de Claude Perrault, 1673<sup>463</sup> :

Car la voix n'est autre chose que l'haleine qui étant poussée fait impression sur l'organe de l'ouïe, par le moyen de l'air qu'elle a frappé, dont l'agitation forme une infinité de cercles. Mais comme lorsqu'on jette une pierre dans un étang, on voit qu'il s'y fait quantité de cercles qui vont toujours en croissant depuis le centre, et qui s'étendent fort loin, s'ils n'en sont empêchés par la

<sup>460</sup> Diogène Laërce, *Vies, doctrines et sentences des philosophes illustres*, Traduction Robert Genaille, 1933, livre VII.

<sup>461</sup> Pierre Costabel, 'L'acoustique du XVIème au XVIIIème siècle', in René Taton, *Histoire générale des sciences*, t 2, La science moderne, Paris, PUF, 1958, p.528.

<sup>462</sup> Héron d'Alexandrie, *De speculis*, ed. W. Schmidt, I, 18, p.316.

<sup>463</sup> Vitruve, *Dix livres d'architecture*, trad. Claude Perrault, Paris, 1673, V, 3, p.148.

petitesse du lieu, ou par d'autres obstacles, et que, s'ils rencontrent quelque chose, les premiers cercles qui sont arrêtés, arrêtent et troublent l'ordre de ceux qui suivent.

Ainsi la voix s'étend en ronds, et fait plusieurs cercles : il y a pourtant cette différence que dans un étang les cercles ne se font que sur la surface de l'eau, au lieu que les cercles qui sont faits par la voix vont toujours en s'étendant, non seulement en largeur mais même en profondeur, montant comme par degrés, en sorte que, si rien n'arrête le premier cercle, le second ni ceux qui suivent ne sont point troublés, de manière que la voix arrive distinctement et sans confusion aux oreilles de ceux qui sont assis en haut, aussi bien que ceux qui sont en bas.

Traduction Ch. L. Maufras<sup>464</sup> :

La voix est un courant d'air dont les ondes sonores viennent frapper l'organe de l'ouïe. L'agitation qu'elle produit forme une infinité de cercles. Lancez une pierre dans une eau dormante, vous y verrez se faire une multitude d'ondulations circulaires qui s'élargissent à partir du centre, et qui s'étendent fort loin, à moins qu'elles ne soient arrêtées par l'espace étroit du lieu, ou par quel qu'autre obstacle qui ne permette point que ces ondulations prennent leur entier développement; que quelque empêchement vienne donc à se présenter, et l'on verra la confusion jetée dans les premiers cercles se communiquer aux suivants.

La voix en s'agitant produit aussi des cercles. Il y a pourtant cette différence, que les cercles qui se font sur l'eau se meuvent à sa surface; tandis que la voix ne s'étend pas seulement en largeur, elle monte, elle s'élève par degrés. Il en est des ondulations de la voix comme de celles de l'eau; si aucun corps interposé ne vient rompre la première ondulation, la seconde et les suivantes n'éprouvent aucun trouble; toutes arrivent aussi distinctement aux oreilles de ceux qui sont le plus bas placés, que de ceux qui le sont le plus haut.

Claude Perrault ne traduit pas *unda* par 'ondes'; M. Maufras, le traducteur du XIX<sup>ème</sup> siècle, n'a pas résisté à cette tentation d'employer un vocabulaire moderne, c'était fréquent à cette époque. Le terme *unda* veut dire plutôt une 'eau agitée' ou encore une 'vague'. Le mot 'onde', et le vocabulaire de la physique qui en est issu, lorsqu'il désigne cette perturbation du milieu qui progresse de façon circulaire, est introduit par Huygens dans le *Traité de la lumière*, à la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle.

Par ailleurs, il convient de tenir compte de l'expression *sine resonantia* qui, certes, pourquoi pas, peut signifier 'distinctement'. Toutefois il serait plus précis d'utiliser la traduction littérale : 'sans écho' ou 'sans réverbération'<sup>465</sup>. Cette notion de réverbération, fréquente en acoustique des lieux scéniques, et rencontrée lorsqu'il y a un obstacle interposé qui rend la voix indistincte, méritait d'être exprimée :

Igitur ut in aqua undarum designationibus, ita in voce cum offensio nulla primam undam interpellaverit, non disturbat secundam nec insequentes, sed omnes sine resonantia perveniunt ad imorum et ad summorum aures.

Il serait plus juste de traduire ainsi :

[Donc, comme dans l'eau avec les formes des vagues, c'est la même chose dans la voix, du moment qu'aucun obstacle n'a arrêté la première vague, rien ne perturbe la seconde ni les suivantes, et de plus toutes parviennent aux oreilles de ceux qui sont en bas et en haut, sans réverbération.]

Par ailleurs, alors que la description de Vitruve expose bien le phénomène des vagues provoquées dans l'eau, il est probable que les auteurs plus tardifs qui reprennent la comparaison des ronds dans l'eau ne se soient pas référés directement au texte de Vitruve, mais plutôt aux textes du corpus scolastique.

Par exemple, la dernière phrase du premier paragraphe dit :

Itaque quum interpellentur offensionibus, primae redundantes insequentium disturbant designationes.

[Et ainsi lorsqu'elles sont empêchées par des obstacles, les premières formes qui refluent en débordant perturbent celles qui suivent.] (traduction personnelle)

Et en effet, si on reproduit l'expérience, c'est à peu près ce qui se passe. Or, dans toute la littérature d'inspiration scolastique, on trouve une description des ondes heurtant une paroi et se réfléchissant sans perturber le déplacement des premières. Même si on constate effectivement, parfois, le phénomène de superposition sans entrave des ondes incidentes, il faut bien admettre que le pus souvent le résultat est une espèce de confusion bouillonnante qui ne produit pas grand chose. Il s'agit, chez ces auteurs, d'une

<sup>464</sup> Ch. L. Maufras, *L'architecture de Vitruve*, Ed. Panckoucke, Paris, 1847, t 1, p.467-469.

<sup>465</sup> Le dictionnaire 'Gaffiot' se réfère d'ailleurs à ce passage de Vitruve pour donner sa définition : '*resonantia*', 'écho'.

interprétation très idéalisée de la réalité. Et c'est ainsi qu'on retrouve cette idée chez Boèce, au Vème siècle, dans le *De Institutione Musica*, au début de l'ouvrage dans un passage consacré à la physique des sons :

Quod si quid sit, quod crescentes undas possit offendere, statim motus ille revertitur et quasi ad centrum, unde profectus fuerat, eisdem undulis rotundatur.

[Quant à ce qui arrive si quelque chose peut arrêter les vagues croissantes, aussitôt ce mouvement se retourne pour ainsi dire vers le centre d'où il est venu et s'arrondit par les mêmes petites vagues.]

Comme Boèce est une des sources de Thomas d'Aquin, lui-même vénéré par de nombreux philosophes du Moyen Âge et de la Renaissance, ceux-ci reprennent la phrase sans reproduire l'expérience ni même relire le texte de Vitruve.

Et c'est ainsi que l'écho est expliqué dans de nombreux ouvrages : le son se propage comme les ronds dans l'eau qui, comme chacun sait, lorsqu'ils heurtent la paroi, reviennent vers le centre en décrivant les mêmes cercles, sans se perturber...

D'autre part, Vitruve insiste bien sur le caractère spatial de la propagation du son, c'est-à-dire :

Eadem ratione vox ictu ad circinum efficit motiones, sed in aqua circuli planitie in latitudinem moventur ; vox et in latitudine progreditur, et altitudinem gradatim scandit.

« La voix se propage progressivement en largeur et en hauteur », ce qui décrit une progression sphérique. Cette différence d'avec les vagues sur l'eau, relevée avec pertinence par Vitruve, a toute son importance, parce qu'elle explique beaucoup de propriétés de la diffusion du son. Les utilisateurs successifs de cette comparaison n'y accordent pourtant pas la place nécessaire, sauf ceux qui ont lu Averroès.

### Averroès : Le commentaire du *De Anima*

Dans certaines éditions de la Renaissance du *De anima* d'Aristote, on trouve les commentaires d'Averroès, qui ont donné lieu à bien des controverses parmi les philosophes scolastiques.

On y trouve, à propos de la propagation du son, au chapitre 8 du livre II <sup>466</sup>:

Extrait 1, édition Sophianos, 1562:

Extrait 2, édition Scotus, 1495 :

<sup>466</sup> Extrait 1 : Aristote, *Aristotelis de anima libri tres cum Averrois commentariis*, trad. Sophianos, Venise, 1562, p.91.

Extrait 2 : *Opera Aristotelis ; cum Averrois commentaria*, ed. Octavianus Scotus, Venise, 1495, p.306.

Sed debes scire quod illud quod fit in aere de percussione corporum ad invicem est simile ei quod fit in aqua quando lapis projicitur in aquam de circulatione fit quia fit in aere apud percussione figura sphaerica : aut prope sphaericam ; cujus centrum est locus percussione per expulsionem aeris ab illo loco aequaliter ; aut prope.

Traduction personnelle :

[Mais on doit savoir que ce qui arrive dans l'air à propos de la percussione des corps entre eux est similaire à ce qui arrive dans l'eau quand une pierre a été jetée et qui fait des cercles, parce qu'il se produit dans l'air à l'endroit de la percussione une figure sphérique ou presque sphérique, dont le centre est le lieu de percussione, à cause de l'expulsion de l'air de ce lieu, de la façon uniforme, ou presque.]

Lorsqu'il utilise l'analogie des ronds dans l'eau, Averroès parle bien de '*figura sphaerica*' (ou '*sperica*') pour illustrer la propagation du son. On peut alors penser qu'Averroès ne s'inspirait pas de Boèce, mais directement de Vitruve qu'on devait probablement trouver sans difficulté en Andalousie à cette époque. La description que fait Averroès de la propagation du son est de ce fait beaucoup plus précise car il fait la corrélation entre le mouvement de l'air et la propagation sphérique du son. Averroès ne se contente pas de décrire ce qui se passe sur l'eau, il décrit ce qui se passe dans l'air après la percussione sonore. Le centre de la sphère est le lieu du choc, et si la propagation se produit de façon sphérique, c'est parce que l'air est expulsé du lieu qu'il occupait précédemment.

Quoi qu'il en soit, Averroès, après Vitruve, l'inspirateur de la modélisation des ronds dans l'eau comme représentation d'un phénomène physique, ce que ne font pas les scolastiques héritiers de Boèce.

## Les Scolastiques

Thomas d'Aquin, pourtant opposé au savant arabo-andalou, mais sans doute inspiré par Boèce qu'il vénérât, ajoute cette représentation dans son propre commentaire au *Traité de l'Ame*<sup>467</sup> :

[...] Il peut en aller de l'affection de l'air, lors de la production du son, comme de l'affection de l'eau, quand une chose y est projetée. En effet, il se produit des ronds autour de l'eau frappée. Ceux-ci, près du lieu du coup, sont petits, et le mouvement est fort. Mais plus loin, les ronds sont grands, et le mouvement plus faible. Enfin, le mouvement s'évanouit totalement, et les ronds disparaissent. Si toutefois, avant que le mouvement ne cesse, les ronds rencontrent un obstacle, il se forme des ronds en sens contraire; et cela avec d'autant plus de véhémence qu'on est plus près du premier choc.

Voici le texte dont s'inspire Thomas d'Aquin, extrait du *De institutione Musica* de Boèce<sup>468</sup> :

De quelle manière nous entendons.

XIII. Parlons à présent de la manière dont nous entendons. On considère d'ordinaire qu'il advient aux sons ce qui se produit lorsqu'on lance, de haut, une pierre dans un étang ou dans des eaux dormantes. D'abord elle provoque une onde dans un cercle très petit, puis elle propage les orbes de ces ondes de plus en plus grands jusqu'au moment où le mouvement s'apaise, épuisé par la diffusion des flots. Et ainsi, de proche en proche, l'onde se répand sous l'effet d'une poussée toujours plus faible. Dès qu'un obstacle vient entraver l'accroissement des ondes, aussitôt le mouvement s'inverse et c'est comme s'il revenait au centre d'où il était parti, empruntant les mêmes ondelettes. Ainsi, dès lors que l'air frappé aura produit un son, il en ébranle un autre tout proche et provoque ainsi une sorte de flux d'air circulaire. C'est pourquoi il se répand et frappe en même temps l'ouïe de tous ceux qui l'entourent. Et le son est moins net pour celui qui se tient plus loin puisque l'onde d'air percuté qui lui parvient est plus faible.

Dès lors, dans le monde intellectuel occidental chrétien, chez les Averroïstes comme chez les Thomistes, la comparaison entre la propagation des sons et les 'ronds dans l'eau après qu'on y a jeté une pierre' devient la référence et tient lieu d'analogie et d'explication du phénomène sonore. On la trouve également chez les auteurs qui abordent la physique des sons dans les ouvrages consacrés à la musique et à l'harmonie. En effet, les textes de Thomas d'Aquin et de Boèce constituent les bases de leur formation musicale théorique. C'est ainsi qu'on trouve, par exemple, ces lignes dans un ouvrage de théorie musicale de Salomon de Caus paru en 1615 fortement inspiré par Vitruve et Boèce<sup>469</sup>:

<sup>467</sup> Thomas d'Aquin, *Commentaires au Traité de l'Ame*, trad. Y. Pelletier, Univ. Laval Québec, 2000, livre II, leçon 16, p.115.

<sup>468</sup> Boèce, *De institutione musica*, trad. Christian Meyer, Brepols, Turnhout, 2004, livre I, p.55.

<sup>469</sup> Salomon de Caus, *Institution harmonique*, Francfort, 1615, Tome 1, Partie I, p.3.

[...] ainsi l'air étant ému par le son, cette motion (comme le dit Vitruve et plusieurs autres bons auteurs depuis lui) se forme en figure sphérique, et tout ainsi comme l'on jette une pierre dans l'eau d'un lac, il se fait une motion de plusieurs cercles, s'élargissant jusqu'à ce que la motion n'a plus de force ; ainsi l'air étant ému du son, il se fait une motion en figure sphérique s'élargissant autant comme le son a de force. Et la preuve de ceci se peut ouïr journellement, quand il se fait quelque musique de voix ou d'instrument dans une chambre close, car elle est beaucoup plus forte que si la dite musique se faisait en pleine rue ou en campagne, où la voix se perd en l'air, et au contraire elle est resserrée dans une chambre close.[...]

Ici la pierre n'est pas jetée dans une citerne ni dans un étang, mais dans un lac... La référence à la diffusion sphérique, et non seulement circulaire comme chez Boèce et Thomas d'Aquin, laisse penser qu'il y a ici une inspiration Averroïste. Salomon de Caus se fait également physicien quand il décrit et compare l'affaiblissement du son lors de sa propagation à l'air libre, et dans un air confiné. Le son est alors 'resserré', cette approche de la diffusion du son s'oppose à celle de la réverbération sur les parois qui sera décrite un peu plus tard par Francis Bacon et bien d'autres. Par ailleurs la description du processus d'affaiblissement lié à l'extension sphérique de la 'motion' est nouvelle.

On retrouve également un développement de cette représentation dans les ouvrages de médecine, dans les chapitres consacrés à l'audition, comme par exemple chez Volcher Coiter, médecin néerlandais du XVI<sup>ème</sup> siècle<sup>470</sup>.

Titelmans, franciscain flamand du début du XVI<sup>ème</sup> siècle, introduit l'analogie classique de la pierre jetée dans l'eau et qui forme des ronds :

Sic autem fieri dicunt sonum in collisione corporum, quomodo in aquae superficie fieri videmus, si iniiciatur lapillus. Videmus enim circa locum injectionis in aqua fieri circulos et primum quidem minores, ac deinde continuo majores in longuam distanciam, juxta quod injectio magis fuerit violenta, aut major fuerit aquae circa locum injectionis commotio.

Le ton employé montre bien la déférence envers le dogme répété par tous les philosophes scolastiques, qui ne prennent pas la peine de tenter l'expérience pour pouvoir observer le phénomène. Il est vrai que le phénomène des ronds dans l'eau n'a rien d'extraordinaire, et que chacun a pu le constater dans la vie courante. Il est probable également que la représentation du son au moyen de ce modèle devait imprégner la connaissance pendant toute une période qui n'envisageait pas la curiosité scientifique comme une qualité. Toutefois, on a ici une attitude très représentative de la pensée scolastique qui procède par citation des textes en leur portant une confiance aveugle.

### **Pertinence – ou non – de l'analogie des ronds dans l'eau**

Cette analogie, ou plutôt cette comparaison car elle n'explique pas mais elle illustre, décrit correctement la réalité d'un phénomène de mouvement local sans transport de matière, c'est-à-dire le déplacement d'une perturbation, ce qu'Aristote n'avait pas envisagé dans ses catégories de mouvements. L'idée, qui peut paraître audacieuse, ne sera pas vraiment approfondie avant longtemps, sans doute en raison du peu d'intérêt pour l'étude de la nature physique du son des savants jusqu'à la Renaissance tardive.

De nombreux savants du XVII<sup>ème</sup> siècle n'ont pas l'air convaincus par cette métaphore, et émettent des doutes sur sa pertinence qui peut induire de fausses notions. En effet, le phénomène des ronds dans l'eau s'explique de cette façon : le caillou produit, lors de l'impact et à cause de son poids, une chute du niveau d'eau localisée au point d'entrée dans l'eau. Du fait de la non-compressibilité de l'eau, cette dépression est compensée par une élévation du niveau, circulaire de faible diamètre, autour du point d'impact. Cette eau, élevée malgré elle au-dessus de son niveau de repos, redescend à cause de son poids. Au cours de cette chute, elle rencontre, 'en arrière' la force du mouvement d'eau qui l'a fait monter et qui la contraint à trouver une autre voie. Cette voie ne peut être qu'en direction de l'extérieur, là où l'eau ne rencontre ni force, ni obstacle dans sa progression. Cette partie d'eau provoque donc le même phénomène de poussée vers une partie d'eau inerte, en formant un cercle d'eau surélevée de diamètre plus grand. Cette eau redescend selon le même processus. Et ainsi de suite.

Il s'agit de la transmission successive d'un choc, et, en ce qui concerne le son, cette image représente l'approche, qu'on pensait alors authentiquement aristotélicienne, développée dans le *De audibilibus*, c'est-à-dire la progression d'un choc sur une partie d'air qui se communique à la partie conjointe, à partir du corps sonore jusqu'à l'oreille. Il n'est question, dans le *De audibilibus*, ni de vibrations, ni d'élasticité, ni bien entendu d'aucune des propriétés du son. C'est par facilité intellectuelle, on l'a vu, qu'on a assimilé cette théorie à la théorie ondulatoire du son, particulièrement au XIX<sup>ème</sup> siècle, lors d'un retour des idées aristotéliciennes.

<sup>470</sup> Volcher Coiter, *Externarum et internarum principalium humani corporis partium tabulae*, Nuremberg, 1573, p 88-105, p 89.

Le choc initial est une perturbation du milieu, et ce choc se propage, sans transport de matière. Nous allons apprendre qu le son est également une perturbation du milieu sans ransport de matière. C'est là la seule ressemblance entre les deux processus.

Les ronds dans l'eau expriment une diffusion circulaire, ce qui est inexact pour le son, puisque la propagation est sphérique, et cela posera problème lorsqu'on cherchera à définir l'atténuation du son avec la distance. La distance entre les cercles (la 'longueur d'onde'), et leur vitesse de progression (on dit plutôt 'célérité' car il n'y a pas de transport) sont surtout dépendantes de la profondeur de l'eau, et un peu de la force du choc. L'interprétation erronée de ces paramètres induit l'idée que la hauteur du son (qu'on attribue avec raison à la répétition des chocs) est liée à l'intensité, et que la vitesse est variable. D'autre part, les promoteurs de cette représentation n'hésitent pas à déformer un peu la réalité lorsqu'ils expliquent la réflexion par des cercles identiques, après la rencontre avec un obstacle, ainsi que la rencontre de plusieurs systèmes d'ondes sans perturbation de la progression, comme on le constate pour le son.

Finalement, la seule caractéristique commune aux ronds dans l'eau et à la propagation du son, c'est le déplacement sans transport de matière et la découverte d'un nouveau type de mouvement qu'Aristote n'avait pas prévu. Cette caractéristique est importante, la modélisation est pédagogique, mais c'est justement ce point qui est le plus écarté par les Scolastiques.

### ***L'analogie des ronds dans l'eau au XVIIème siècle***

Les principaux auteurs traitant de la physique des sons au cours de la première partie du XVIIème siècle, alors que la science moderne est en cours d'élaboration à partir d'observations et d'expériences, sont Galilée, Mersenne, Francis Bacon et Gassendi. Chacun à sa manière reprend ou réfute la modélisation des ronds dans l'eau en ébauchant parfois une théorie ondulatoire qui ne sera finalement développée que bien plus tard.

#### **Le silence de Francis Bacon dans *Sylva sylvarum***

Francis Bacon n'utilise pas la comparaison avec les ronds dans l'eau. La proposition 201, qui ouvre le 'Century III' est très claire et tient en trois lignes<sup>471</sup> :

All sounds whatsoever move round ; that is to say, on all sides ; upwards, downwards, forwards, and backwards. This appeareth in all instances.

[Tous les sons, quels qu'ils soient, ont un mouvement circulaire ; c'est-à-dire de tous les côtés, vers le haut, vers le bas, en avant et en arrière. C'est ce qui se produit dans tous les cas.]

Plus loin, pour compléter cette proposition laconique, Bacon précise<sup>472</sup> :

Sounds [...] spread round, so that there is an orb or spherical area of the sound [...]

[Les sons se propagent en cercles, [...], il y a ainsi une orbe, ou une aire sphérique du son.]

Mais point de ronds dans l'eau pour représenter la propagation du son chez Francis Bacon, dans son ouvrage d'histoire naturelle. Les observations lui semblent se suffire à elles-mêmes sans qu'il soit besoin d'utiliser de métaphore, ce qu'il fait rarement d'ailleurs, dans les deux longs chapitres du *Sylva sylvarum* qui traitent du son.

Il faut néanmoins relever juste une allusion, tout à fait à la fin du Century III, Bacon parle de l'extinction rapide du son, et suggère une piste:

[...] the air suffereth some force by sound, and then restoreth itself ; as water doth ; which being divided, maketh many circles, till it restore itself to the natural consistence.

[...] l'air subit une force de la part du son, et se rétablit ensuite ; comme le fait l'eau qui, étant divisée, fait plusieurs cercles, jusqu'à ce qu'elle se rétablisse dans sa consistance naturelle.

Francis Bacon avait écrit plus longuement sur ce sujet dans le court traité sur le son écrit vers 1608 et inédit, *Historia soni et auditus* :

Quandoquidem sonus tam subito generatur, et continuo pereat, necesse videtur ut aut generatio ejus aerem de sua natura paulum dejiciat, atque interitus ejus restituat ; ut in compressionibus aquarum, ubi corpus in aquam injectum complures circulos efficiat in aquis, qui proveniunt ex aqua primum compressa, deinde in suam consistentiam et dimensionem restituentem (in quod 'motum libertatis' appellare consuevimus).

<sup>471</sup> Francis Bacon, *Sylva sylvarum*, 1627, ed. Spedding, London, 1859, vol II, century III, prop. 201, p.414.

<sup>472</sup> *Idem*, prop. 204, p.414.



[Puisque le son est produit tellement subitement, et disparaît sur le champ, il semble nécessaire que sa génération détourne l'air un instant de sa nature, et que sa destruction le remette en place ; comme dans les compressions des eaux, lorsqu'un corps jeté dans l'eau y produit plusieurs cercles proviennent de l'eau d'abord compressée, et ensuite la rétablit dans sa dimension et sa consistance (ce que nous avons l'habitude d'appeler 'mouvement de liberté')]

Cet aspect du processus sonore est original, et fait intervenir un type de mouvement, le retour au repos, que Bacon développe dans *Novum Organum*, parmi les dix-neuf types de mouvements qu'il identifie<sup>473</sup> :

Sit Motus Tertius, Motus (quem appellamus) Libertatis ; per quem corpora se liberare nituntur a pressura aut tensura praeter-naturali, et restituere se in dimensum corpori suo conveniens

Soit le troisième mouvement, que nous appelons mouvement de liberté ; par lequel se libèrent les corps raidis par une pression ou une tension non naturelle, et reviennent à la dimension qui convient.

Ce *motus libertatis*, qu'on pourrait définir comme un mouvement de réaction, est décrit par Bacon comme le processus de retour à ses premières dimensions d'un corps comprimé ou dilaté. Bacon cite comme exemple l'eau, l'air avec le vent, les lames d'acier, etc. Il s'agit ni plus ni moins que de l'élasticité. Le propos de Bacon, dans cet extrait, est d'identifier la nature de ce mouvement qui perdure alors que sa cause a cessé. Bacon pose le problème mais n'y répond pas. Il est dommage qu'il ne développe pas cette idée, ainsi que l'application du mouvement élastique au son. Il se limite à une description sommaire de ce type de mouvement dans cet extrait de *l'Historia soni et auditus*, en quelques lignes, et en moins encore à la fin de *Sylva sylvarum*. Pourtant Francis Bacon avait bien mis ici le doigt sur cette propriété essentielle de la propagation du son, l'élasticité du milieu de propagation.

Toutefois, c'est ici la seule allusion aux cercles que fait l'eau lorsqu'elle subit un choc et Bacon ne l'utilise pas dans le but de modéliser la propagation des sons

### Les réserves de Mersenne dans l'*Harmonie universelle*

Le livre premier de l'*Harmonie universelle* est consacré à la physique des sons. Mersenne s'intéresse à la propagation des sons dès le début du livre et il évoque bien entendu l'analogie des ronds dans l'eau. Dans un premier temps il la cite à propos de la propriété de superposition et semble dire que cette analogie mérite d'être approfondie<sup>474</sup> :

Quand deux ou plusieurs hommes parlent en même temps, l'air retient les impressions qu'il reçoit de chacun d'eux, comme l'eau calme reçoit celles des pierres que l'on jette dedans, car l'on remarque qu'elle font des cercles différents, qui s'étendent peu à peu jusqu'aux bords, et qui ne sont pourtant pas si distincts ni si remarquables que si l'on jetait une seule pierre ; mais la difficulté de ces cercles mérite un discours particulier. C'est pour la même raison que les voix de deux ou plusieurs hommes qui se parlent en même temps sont plus confuses et moins intelligibles que quand ils parlent l'un après l'autre.

Les cercles ne sont pas si distincts, mais c'est suffisant pour représenter la superposition de plusieurs systèmes d'ondes qui, en principe ne se perturbent pas, comme pour le son, lorsque deux personnes se parlent, ou lorsque deux instruments jouent en même temps. C'est en effet la propriété du son la plus délicate à aborder. Si Mersenne accepte le modèle, notamment pour représenter cette possibilité de superposition de sons émanant de deux sources distinctes, il semble un peu plus réticent pour sa généralisation aux autres propriétés des sons. En effet, un peu plus loin, il reprend l'analogie mais, en quelque sorte, par défaut, faute d'une représentation plus conforme à une réalité inobservable<sup>475</sup> :

Puisque nous ne voyons pas l'air [...], il semble que nous ne pouvons mieux expliquer ou comprendre la manière dont se meut l'air quand il sonne, que par celle dont se font les mouvements de l'eau par les corps qui se meuvent dedans et qui la battent avec violence. Car il ne faut pas seulement s'imaginer le mouvement qu'on voit sur l'eau lorsqu'elle fait des cercles qui vont toujours en croissant depuis le lieu où la pierre a été jetée, qui leur sert de centre, jusqu'aux bords du vaisseau qui la contient. Mais il faut remarquer si elle fait de semblables mouvements jusqu'au fond et si ces cercles s'étendent dans toute la profondeur où la solidité de l'eau, comme l'on peut conclure tant par les sons qui se font dans l'air que par ceux qui se font dans l'eau, car on les oit également de tous les côtés, quoiqu'il soit plus malaisé de l'expérimenter dans l'eau que dans l'air dans lequel les fusées et les feux artificiels qui font leur bruit à cent toises de haut, se font également ouïr de tous les côtés tant en haut qu'en bas.

<sup>473</sup> Francis Bacon, *Novum organum*, livre II, XLVIII, 3.

<sup>474</sup> Marin Mersenne, *Harmonie universelle*, Paris, 1637, livre I, prop. 2, p.4.

<sup>475</sup> *Idem*, prop. 5, p.9.

Mersenne identifie une première anomalie dans cette analogie, c'est le type de volume de croissance de l'onde, sphérique ou cylindrique. Et comme on sait que le son se propage dans l'eau, il distingue cette propagation, sphérique (le son se fait « également ouïr de tous les côtés »), de celle des ondes consécutives au chocs qui elles vont se développer dans l'eau selon un cylindre autour du point d'impact. Malheureusement il ne développe pas cette étude, et ne conclut pas sur la pertinence de l'analogie. Néanmoins Mersenne adopte cette modélisation : « Il semble que nous ne pouvons mieux expliquer ou comprendre la manière dont se meut l'air quand il sonne ».

En revanche, Mersenne, au livre III de l'*Harmonie Universelle*, se fait très critique envers cette comparaison à laquelle il n'accorde plus le statut d'explication<sup>476</sup> :

Mais il n'est pas certain que le son se fasse par lesdits cercles de l'air, et quand cela serait certain, l'on aurait encore sujet de douter s'il faudrait comparer ceux de l'eau avec ceux de l'air, parce qu'il est certain que le son qui se fait sous l'eau ne se porte pas par les cercles visibles que nous voyons dessus, autrement le son emploierait autant de temps à venir du fond de l'eau jusqu'à l'oreille, comme les cercles à s'étendre par un espace égal: ce qui n'arrive pas, puis qu'il semble que le son fait sous l'eau s'entend aussi vite que celui qui se fait dans l'air, soit que l'on plonge l'oreille sous l'eau, où se fait le son, ou qu'elle demeure dans l'air, comme nous avons expérimenté. D'où l'on peut conclure que le son se fait, tant dans l'air que dans l'eau, par un mouvement et par des cercles inconnus, et que la qualité de cette impression n'est pas moins invisible que celle des missiles: car si le son se produit par des cercles semblables à ceux de l'eau, comme peut-il arriver que les vents contraires qui semblent se faire par d'autres cercles contraires, ne retardent point le son: ce qui est aussi malaisé d'expliquer par les images que l'on appelle espèces intentionnelles, puisque l'on avoue qu'il est nécessaire qu'elles soient accompagnées du mouvement et des cercles de l'air.

Cet extrait, qui figure dans un corollaire de la proposition 21, dans laquelle Mersenne corrige un certain nombre de résultats qu'il avait énoncés sur l'écho au livre I, est riche d'informations sur l'évolution de la pensée de Mersenne au long de la rédaction du volumineux ouvrage. C'est en étudiant la vitesse du son que Mersenne entreprend cette réflexion que personne n'avait eue auparavant sur la pertinence de ce modèle. Il s'aperçoit de l'inexactitude de la comparaison des ronds dans l'eau, et, prudent, préfère dire que le son se propage 'par un mouvement et des cercles inconnus'. Il profite de l'occasion pour lancer deux petites attaques contre les deux courants dont il se défie, l'atomisme, avec 'l'invisibilité des missiles', et la scolastique avec 'les images que l'on appelle espèces intentionnelles', expression que Mersenne refusait d'admettre parce que dénuée de sens, et que d'ailleurs les scolastiques eux-mêmes contestent puisqu'ils sont contraints d'accepter « qu'il est nécessaire qu'elles soient accompagnées du mouvement et des cercles de l'air. »

### La curieuse adhésion de Gassendi au modèle

Dans les *Animadversiones*, Gassendi développe largement sa théorie sur le son inspirée de l'atomisme d'Epicure et surtout de Lucrèce qu'il cite abondamment. Pourtant, alors qu'il achève une comparaison, pertinente d'ailleurs, entre la propagation du son et une sorte d'arrosage de corpuscules sonores, à la manière des 'foulons' qui soufflent l'eau sur un drap, il énonce cette image des ronds dans l'eau. Gassendi explique que le son se propage sur une même distance dans des temps égaux, que le son soit fort ou faible, ce qui constitue une avancée importante qui lui est amenée par les propagations comparées du canon et du mousquet qui se font dans le même temps. Cette expérience suffisait à énoncer cette loi, mais Gassendi juge qu'elle mérite une métaphore, et il l'emprunte, c'est lui-même qui le dit, aux Stoïciens. Sa source n'est ni Vitruve, ni Thomas d'Aquin, mais Diogène Laërce sur qui portent précisément les *Animadversiones*<sup>477</sup> :

Quâ ratione porro id fiat, insinuatur a stoicis, quatenus docent, ut Plutarchus et Laertius memorant, aerem percussus, quod continuus fit, perinde formari in orbeis, ac placida aqua, lapide injecto, formatum in circulos. Quippe haec in aqua circulorum formatio nihilo segnius, aut velocius fit, sed ad ripam usque pari tenore continuatur, seu lapis magnus, seu parvus fit ; et seu magna vi, seu parva incidat in aquam.

[La raison pour laquelle cela se fait [l'égalité des vitesses] est introduite en leur temps par les stoïciens qui enseignent, comme Plutarque et Laërce le rappellent, que l'air percuté, en restant continu, prend une forme de courbe, comme une eau tranquille dans laquelle une pierre a été jetée prend la forme de cercles. En effet, cette formation des cercles dans l'eau ne se fait en rien plus lentement ni plus rapidement, mais se continue jusqu'au bord par un mouvement égal, que la pierre soit grosse ou petite et qu'elle entre dans l'eau avec une grande ou une faible force.]

Juste après, Gassendi évoque Aristote, Simplicius et Alexandre, ce qui semble bien constituer des amabilités envers un courant d'idée qu'il craint, à juste titre, de choquer avec sa théorie atomiste et ses

<sup>476</sup> *Id.*, livre III, prop.21, corollaire 4, p.218.

<sup>477</sup> Pierre Gassendi, *Animadversiones in libri X Diogenis Laertii*, Barbier, Lyon, 1649, p.279.

références à Epicure, véritable épouvantail pour la pensée scolastique catholique. Il ne faut pas oublier que Gassendi fait partie du clergé, et il ne cherche pas à provoquer, au contraire. Il est tout à fait conscient du caractère choquant de ce qu'il avance. Cette allusion marquée et cette reprise de la métaphore des ronds dans l'eau est une espèce de concession faite au discours dominant. Gassendi n'en avait pas besoin. Curieusement, peut-être pour absorber le discours adverse en montrant que ses métaphores sont les mêmes, les savants qui lui succèdent font souvent référence à au texte de Gassendi pour évoquer l'égalité des vitesses de propagation du son, ce qui d'ailleurs est vrai pour le son, mais absolument inexact pour les ronds dans l'eau.

### Galilée : l'expérience des ondes dans un verre d'eau

Galilée étudie la nature physique du son au cours de la première journée du *Discours sur deux sciences nouvelles*, à la suite du développement de la théorie des mouvements vibratoires du pendule. Galilée se propose de définir une relation mathématique entre le nombre de vibrations dans le même temps et la hauteur du son. Pour vérifier son hypothèse Galilée a besoin d'une observation du phénomène sonore, et suggère deux pistes. La seconde, les traces laissées par un couteau qui frotte sur une surface métallique en produisant un grincement, fait ici l'objet d'une étude particulière<sup>478</sup>. Mais avant de proposer cette méthode, Galilée nous fait part d'une expérience qui consiste à frotter un archet sur le bord d'un verre rempli d'eau. Il se produit alors des rides à la surface, susceptibles d'être comptées et de vérifier l'hypothèse. Malheureusement cette représentation est fugitive et ne permet pas une expérimentation rigoureuse. Galilée est très préoccupé par ce problème de représentation et de conservation de la trace d'un son. En effet, observateur et expérimentateur, il ne conçoit pas d'étudier seulement à partir d'hypothèses. On est ici en présence des premières manifestations de la science expérimentale.

L'expérience proposée par Galilée est différente de celle des ronds dans l'eau après qu'on y a jeté une pierre. En effet, si cette analogie décrit ce type nouveau de mouvement, elle ne représente pas le son. Ce que cherche Galilée, c'est une trace, une 'écriture' du phénomène sonore qui permette de l'observer.

Galilée cherche à démontrer que la hauteur du son dépend du nombre de vibrations dans le même temps. Et « comme il est impossible de compter les vibrations d'une corde en raison de leur grande fréquence »<sup>479</sup>, Galilée commence à décrire ce qu'on appelle la résonance par sympathie, c'est-à-dire la faculté d'un corps immobile placé à proximité d'un corps sonore de vibrer à l'unisson avec ce corps sonore, pourvu que sa fréquence de résonance soit la même. L'expérience est facile à reproduire et ne pose pas de problème, le phénomène a été maintes fois constaté. Puis le corps récepteur est remplacé par un verre vide qui vibre à l'unisson. Galilée constate alors<sup>480</sup> :

Si l'on touche vivement avec un archet une grosse corde de viole, un verre aux parois minces et polies que l'on aura posé à proximité et dont le ton sera à l'unisson de la corde, tremblera et résonnera de façon audible.

Puis l'expérimentateur passe à une seconde phase<sup>481</sup> :

Que le plissement du milieu dont est enveloppé le corps qui résonne se propage amplement, on le constate avec netteté sur un verre rempli d'eau que l'on fait vibrer en frottant sur son bord supérieur l'extrémité d'un doigt : des ondes apparaissent en effet dans l'eau avec une extrême régularité [...]

Galilée propose également une variante en plongeant le verre dans un grand récipient rempli d'eau, les ondes se propagent alors vers l'extérieur à grande distance. Puis Galilée en arrive à son expérience cruciale, pour démontrer que le passage d'une note à l'octave double le nombre de vibrations<sup>482</sup> :

[...] il m'est arrivé aussi plusieurs fois, tandis que je faisais vibrer de cette même façon un très grand verre presque entièrement rempli d'eau, d'abord d'observer les ondes qui se forment dans l'eau avec une parfaite régularité, puis, si le ton du verre venait à monter d'une octave, de voir aussitôt chacune de ces ondes se diviser en deux : phénomène qui prouve clairement que le rapport de un à deux est bien la forme propre de l'octave.

Rappelons que Galilée cherchait à démontrer que les rapports d'intervalles correspondaient à des rapports du nombre de vibrations, et non à des rapports 'magiques', numériques, de longueurs de cordes.

<sup>478</sup> L'expérience de Galilée à propos des traces laissées sur une plaque de cuivre par le grincement d'un couteau a fait l'objet d'une étude approfondie : François Baskevitch, 'L'élaboration de la notion de vibration sonore : Galilée dans les Discorsi', in *Revue d'Histoire des Sciences*, 60-2, A. Colin, Paris, 2007, pp.387-418.

<sup>479</sup> Galilée, *Discours sur deux sciences nouvelles*, trad. M. Clavelin, Paris, Puf, 1970, 1995, p.82.

<sup>480</sup> *Idem*, p.81.

<sup>481</sup> *Ibidem*.

<sup>482</sup> *Ibid.*

Mersenne, dans les *Nouvelles pensées de Galilée*, parues en 1639, relate l'expérience du verre d'eau, mais s'il admet la production des ondes, « l'eau se frise par de petites ondes égales », il avoue ne pas avoir observé le doublement de l'onde au passage à l'octave<sup>483</sup> :

[...] Sur quoi il remarque un effet bien notable, lequel je n'ai point vu, à savoir qu'il arrive quelquefois qu'en frottant le bord d'un verre assez grand, les ondes de l'eau qui frémit dedans viennent à se fendre chacune en deux, lorsque le son du verre passe et saute jusqu'à l'octave haute. D'où il conclut fort bien que la raison de l'octave est double ou d'un à deux.

Mersenne, dans une lettre à Beeckman, évoque l'expérience en déclarant que l'eau semble bouillir<sup>484</sup>.

Penelope Gouk<sup>485</sup> parle d'une expérience de Hooke et Wren en 1680 ('of the motion of bodies upon pressure'), dans laquelle l'eau d'un verre entre en mouvement quand on frotte un archet sur le bord, en produisant différentes figures selon la hauteur du son.

Dans les procès verbaux manuscrits des séances de l'Académie Royale des Sciences, on trouve, en date du 6 novembre 1681 le rapport suivant<sup>486</sup> :

M. Blondel a fait observer qu'ayant fait bouillir l'eau dans un verre en pressant le doigt, quand le son vient à l'octave, les petits cercles se redoublent.

Il est clair que le rapporteur, Du Hamel, n'avait pas très bien compris l'expérience. Alors Fontenelle, dans l'Histoire de l'Académie reconstruit le texte un peu plus clairement<sup>487</sup> :

M. Blondel dit qu'il avait observé que lorsqu'on presse le bord d'un verre plein d'eau avec le doigt en tournant, les petits cercles formés par l'eau mise en ébullition, se redoublent lorsque le ton monte à l'octave, parce que dans ce cas le mouvement est plus vite du double.

Décidément cette expérience méritait mieux qu'un compte rendu approximatif..

Il a donc fallu attendre un siècle et demi, avant que la description de l'expérience soit fidèlement rapportée, et que l'explication du phénomène des ondes sonores dans un verre d'eau soit exposée. En effet, le processus est un peu délicat à interpréter.

Imprégné de l'analogie des ronds dans l'eau, le lecteur peu attentif s' imagine que les ondes se propagent du centre vers le bord en cercles concentriques. Ce n'est pas le cas, nous allons le voir. Il ne s'agit pas ici de la propagation d'une déformation de la surface du liquide consécutive à l'impact, qui se traduit par une succession d'élévations et d'affaissements de la masse liquide. On est bien en présence d'une vibration sonore, identique à celle qui se propage dans l'air, et qui est transmise à l'eau. La paroi du verre vibre, comme Galilée l'a montré avec un verre vide. Ces vibrations correspondent à des déformations du verre lui-même et communiquées à l'eau qu'il contient. Ces déformations ont été très bien décrites et analysées par Chladni à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle dans le *Traité d'acoustique*, à propos de la vibration des solides. Chladni assimile la vibration du verre d'eau à celle d'une cloche qui se déforme de façon périodique en communiquant la vibration à l'air environnant. Ici c'est le processus inverse, la vibration reçue déforme le verre qui la communique à l'eau. Ces vibrations ne sont pas concentriques, mais se forment sur le bord du verre, en arc de cercle, pour se propager vers le centre du verre.

Dans les cloches, comme dans le verre de Galilée, le son s'accompagne de déformations de la structure qui devient périodiquement elliptique selon deux, trois ou quatre axes. Bien entendu, il n'est pas question de compter les vibrations, Galilée en convient. Mais le passage à l'octave, qui se produit par exemple lorsque l'axe du déplacement de l'archet change de direction, produit bien une multiplication de ces arcs de cercle, qui passent de 4 à 6 ou à 8.

Chladni décrit longuement ces phénomènes, dans le chapitre consacré aux vibrations des cloches, avec les illustrations suivantes<sup>488</sup> :

<sup>483</sup> Mersenne, *Nouvelles pensées de Galilée*, Paris, 1639, p.92.

<sup>484</sup> Lettre de Mersenne à Beeckman, oct. 1629, citée par Daniel Pickering Walker, *Studies in musical science in the late Renaissance*, Warburg Institute, 1978, chap. 3, p. 29.

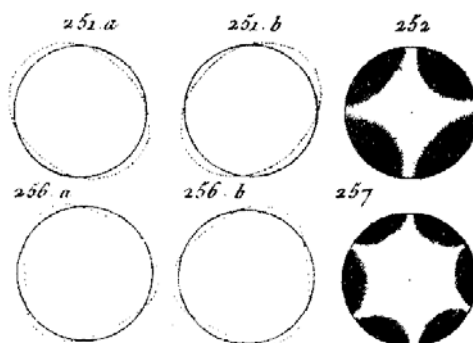
D-P.Walker met en doute l'authenticité de l'expérience. Il semble que lui-même n'ait pas réussi à la reproduire correctement. Pour ma part, je l'ai reproduite et j'ai bien constaté le phénomène.

<sup>485</sup> Penelope Gouk, *Music, Science and natural magic in seventeenth century England*, Yale University Press, New Haven, 1999, p 191.

<sup>486</sup> Académie Royale des Sciences, 'Registre des assemblées du mercredi, Physique' 1679-1683.

<sup>487</sup> Histoire de l'Académie Royale des Sciences, t 1, p.382.

<sup>488</sup> Chladni, *Traité d'acoustique*, trad. française, Paris, 1809, p.231-238.



Si la forme d'une cloche ou d'un vase est assez régulière, et l'épaisseur partout la même, la série des sons possibles est comme les carrés de 2, 3, 4, etc. Quand le son le plus grave est *ut* 2, la série des sons possibles sera :

Nombre des parties vibrantes :	4	6	8	10	12
Sons :	<i>ut</i> 2	<i>ré</i> 3	<i>ut</i> 4	<i>sol</i> * 4 —	<i>re</i> 5 —
Nombre dont les carrés conviennent à ces sons :	2	3	4	5	6

Le passage à la double octave provoque bien l'apparition de 8 parties vibrantes au lieu de 4. Les fréquences correspondent aux carrés de la série, c'est-à-dire 4 parties pour un *ut*2, un *ré*3 (9/4) pour 6 parties, et un *ut* 4 (16/4) pour 8 parties. Si l'on en croit Chladni, le dédoublement des ondes correspondrait donc à une double octave, ce qui n'est pas exactement ce que dit Galilée qui parle du passage à l'octave simple.

Cette expérience est une manipulation courante dans les cours d'acoustique du XIX<sup>ème</sup> siècle, et on trouve par exemple une illustration dans *Le son* d'Amédée Guillemin (1875)<sup>489</sup> :



Cette illustration est accompagnée du texte suivant :

Un verre à moitié rempli d'eau, vibre comme la cloche dont il vient d'être question, lorsqu'on en frotte les bords, soit avec le doigt mouillé, soit avec un archet. De plus on voit alors, sur la surface du liquide, une multitude de stries, qui se partagent en quatre, quelquefois en six groupes principaux, et ces stries sont d'autant plus serrées que le son est plus aigu. Si l'on force l'intensité du son, l'amplitude des vibrations devient si vive que l'eau jaillit de chaque groupe en pluie fine.

<sup>489</sup> Amédée Guillemin, *Le son*, Paris, Hachette, 1875, p.12.

On comprend mieux pourquoi Daniel-Pickering Walker cite Mersenne parlant d'eau qui semble bouillir.

Cette expérience est d'une nature différente de celle des ronds dans l'eau après qu'on y a jeté une pierre, puisque ici, ce sont réellement les vibrations sonores qui provoquent l'apparition des ondes, alors que l'expérience traditionnelle n'est qu'une illustration destinée à comprendre la propagation des ondes, avec tout ce que ce type de comparaison comporte d'inexactitude.

Pour faire évoluer cette représentation il était donc nécessaire d'observer ce qui se passe réellement lorsqu'on jette une pierre dans l'eau. De la Hire se penche sur ce problème dans un court mémoire paru dans l'Histoire de l'Académie Royale des Sciences pour l'année 1693. Ce texte de l'illustre académicien recevra une réponse contradictoire et un peu cinglante, une quarantaine d'années plus tard, de la part de Dortous de Mairan, toujours dans les Mémoires de l'Académie des Sciences.

### **Vers la théorie des ondes sonores : les jésuites Grimaldi, Pardies, Ango**

A Paris, vers 1675, l'Académie Royale des Sciences est le berceau de la théorie des ondes, d'abord sonores, puis lumineuses avec le *Traité de la Lumière* de Christiaan Huygens, écrit vers 1677 mais paru tardivement en 1690.

Un jésuite italien, Grimaldi, avait déjà esquissé la théorie ondulatoire du son vers 1660. Plusieurs savants, jésuites également, participent à l'élaboration de la notion d'onde, comme Gaston Pardies et Pierre Ango.

#### **Grimaldi**

On connaît surtout Grimaldi comme l'initiateur de la notion de diffraction de la lumière, effet qu'il met en évidence en laissant passer un fin rayon lumineux dans une petite ouverture d'une paroi opaque. Son traité principal, paru après sa disparition a pour titre *Physico mathesis de lumine*. Son sujet principal est la propagation et la nature de la lumière et des couleurs. Toutefois, dans un long chapitre, Grimaldi entreprend d'analyser la production et la propagation des sons, dans le but d'en comparer les effets avec ceux de la lumière. Il s'intéresse notamment aux vibrations dans les solides, car il cherche à mettre en évidence le mouvement de tremblement des parties de la matière d'un corps sonore. A cette occasion, il étudie longuement les vibrations des cloches lorsqu'elles sonnent. Il étudie également la propagation du son dans l'air, et dans son texte, on voit apparaître la fameuse analogie des ronds dans l'eau, mais pour représenter un phénomène peu abordé par les physiciens à cette époque, sauf Mersenne, on l'a vu. Il s'agit de la propagation dans un milieu de deux vibrations différentes. Dans le cas du son, le propos est d'expliquer la superposition, dans l'air et sans déformation, de deux informations sonores. Le phénomène est troublant et en dehors de Mersenne, aucun auteur ne se penche sur la question. Dans ce texte de Grimaldi, il n'est pas question d'une eau tranquille, mais de l'eau d'un fleuve où on jette une pierre pour y faire des ronds<sup>490</sup> :

48 - Rursus supponendum est posse eidem corpori sive fluido, sive solido, imprimi plures motus, seu plures impetus effectivos plurium motuum. Videmus hoc manifeste verum in fluidis, ut cum in aqua fluvii delabente formantur circuli alius alio semper latior, si in illam projectus fuerit lapis, qui quidem circuli non sunt omnino perfecti, neque concentrici omnes cum loco, in quo lapis demersus est, ut evenit quando aqua non defluit: nihilominus tunc quoque illi apparent, indicantque illud ipsum aquae, quod deorsum labitur, simul etiam extendi huc illuc versus ripas, ac proinde moveri motu multiplici, seu motu proveniente a multiplici principio. Nolumus autem motus illos re vera plures esse, atque actu distinctos, sed sufficit ad rem nostram, quod cujuscunque particulae in mobili designabilis motus aequivaleat pluribus, qui singillatim possent provenire a pluribus principiis motivis se junctim influentibus in motum.

En revanche, il faut supposer qu'il est possible que plusieurs mouvements ou plusieurs chocs, effets de plusieurs mouvements, soient imprimés au même corps, soit fluide soit solide. Nous voyons cela clairement fondé, dans les fluides comme lorsque, dans l'eau d'un fleuve qui descend, se forment des cercles toujours plus larges les uns que les autres, si on a jeté une pierre dedans, cercles qui ne sont pas tout à fait parfaits, ni tous rassemblés au lieu où la pierre est tombée, comme cela se fait quand l'eau ne s'écoule pas. Pourtant à ce moment là encore ils se disposent à s'étendre çà et là contre les rives, et simultanément imposent à l'eau qu'elle s'écoule vers le bas, et par conséquent ils se meuvent d'un mouvement complexe, ou provenant du mouvement d'un principe complexe. Cependant nous ne voulons pas vraiment que ces mouvements soient plus nombreux, et distincts dans leur poussée, mais il suffit à notre propos, que le mouvement visible d'une particule quelconque en mouvement vaut autant que plusieurs, qui peuvent provenir isolément de plusieurs mouvements premiers s'insinuant séparément dans le mouvement.

<sup>490</sup> F. M. Grimaldi, *Physicomathesis de lumine*, Bologne, 1666, prop. XLIV, p.388-389.

Grimaldi parvient ici, en modélisant la composition de plusieurs mouvements dans un fluide, à expliquer le phénomène de 'croisement' de plusieurs sources sonores.

Avec Grimaldi, les savants jésuites quittent les obscures théories de Kircher et de ses rayons sonores, en ouvrant délibérément la voie à une science plus élaborée qui part de la réalité plus finement observée, et non de principes mystiques. À partir de 1660 environ, plusieurs savants jésuites rejoignent ce courant.

### Gaston Pardies et Pierre Ango

Le plus important, est sans doute le jésuite Gaston Pardies, né dans le Béarn en 1636 et mort prématurément en 1673. Pardies est loin d'être célèbre, et pourtant il mérite une certaine attention de la part des historiens des sciences. On le connaît vraiment depuis la publication en 1971 d'un ouvrage essentiel sur sa courte activité et sur sa pensée<sup>491</sup>. Son auteur est August Ziggelaar, professeur d'histoire des sciences à Copenhague, et lui-même membre de la Compagnie de Jésus.

Le parcours scientifique d'Ignace Gaston Pardies commence entre 1662 et 1665 à Bordeaux où il enseigne les humanités au collège jésuite en achevant ses études de théologie. Auparavant il avait peut-être fait la connaissance de Pierre Fermat lors de ses études à Toulouse, en tout cas, il est en relation avec le mathématicien. Pardies s'intéresse aux cadrans solaires et commence, dès 1661, une correspondance avec Kircher à propos de gnomonique. Fin 1664, Pardies s'intéresse à la comète dont on annonce le passage, et brûle la politesse à Auzout en publiant début 1665 un petit traité où il décrit et prévoit sa trajectoire. Pour la première fois, à Paris, on entend parler du 'jésuite de Bordeaux' comme l'appelle Huygens dans une lettre à Auzout du 12 février 1665. Après un passage au collège de La Rochelle, Pardies revient enseigner les mathématiques et la physique à Bordeaux, avant d'être nommé à Paris, au Collège de Clermont. La carrière de Pardies est courte, et il publie plusieurs traités entre 1670 et 1672. C'est un scientifique jésuite très ouvert aux théories de son temps, et il s'attire des ennuis de la part de sa communauté qui le soupçonne de cartésianisme<sup>492</sup>. Pardies a défrayé la chronique de son temps à ce propos, les cartésiens voyant en lui un allié possible, et il s'est donné beaucoup de mal dans ses écrits, pour se prémunir de ce soupçon. On lui doit notamment un célèbre petit ouvrage de portée philosophique censé attaquer la théorie cartésienne à propos de l'âme des animaux, sujet qui passionnait les salons à cette époque<sup>493</sup>.

Gaston Pardies est en relation, bien entendu, avec les savants jésuites tels que Kircher, Riccioli (mais pas Grimaldi déjà disparu), Fabri, Milliet Dechaies et Bartoli. Mais les académiciens cartésiens, promoteurs de la science moderne, voient également en Pardies un esprit brillant et n'hésitent pas à converser avec lui. Il se fait notamment remarquer par Huygens. Il participe également aux réunions de l'Académie de l'abbé Bourdelot. Dès 1671 il a une réputation internationale. C'est ainsi que Pardies entretient une correspondance non seulement avec Huygens, mais aussi avec Oldenburg, Boyle, Newton, et qu'il rencontre Leibniz à Paris, qui est manifestement impressionné. Il confie plusieurs de ses écrits à Huygens, qui en parle à plusieurs reprises dans sa correspondance avec Oldenburg, comme dans cette lettre du 24 juin 1673, donc après le décès de Pardies, qui fait référence aux documents que le Jésuite lui avait confiés<sup>494</sup> :

[...] Il avait assurément de meilleures choses à donner, et entre autres un petit traité des réfractions qu'il m'a fait voir, et de belles spéculations touchant le son et les flutes, trompettes etc.

Huygens ne peut éviter l'attitude hautaine dont il est coutumier, le petit traité des réfractions était sans doute le '*discours sur le mouvement d'ondulation*' encore au stade de l'écriture, et qui constitue la matière de la théorie de Huygens sur la nature ondulatoire de la lumière. Même si Huygens rend un petit hommage un peu méprisant à Pardies et à Hooke au début du *Traité de la lumière*, il est probable que sans Pardies qui lui avait indiqué la voie, et sans doute beaucoup plus, Huygens n'aurait jamais pu élaborer sa théorie. Il le reconnaît implicitement, d'ailleurs dans sa correspondance tardive.<sup>495</sup>

<sup>491</sup> August Ziggelaar, *Le physicien Ignace Gaston Pardies S.J. (1636-1673)*, Odense university press, Copenhague, 1971.

<sup>492</sup> Voir à ce sujet un long article, non signé, consacré à la vie et à l'œuvre de Gaston Pardies, dans le *Journal de Trévoux*, avril 1726, pp.664-693.

<sup>493</sup> Gaston Pardies, *Discours de la connoissance des bestes*, Sebast, Paris, 1672.

<sup>494</sup> Christiaan Huygens, *Oeuvres complètes*, Ed. Nat. Hollandaise, Nijhoff, La Haye, 1937, t 7, *Correspondance*, lettre n°1951, 24 juin 1673, p.316.

<sup>495</sup> Voir à ce sujet August Ziggelaar, *op. cit.* chapitre 11 ; d'après A. Ziggelaar, Emile Verdet partage cette opinion, ainsi que, dans une moindre mesure, Pierre Duhem.

On a redécouvert Pardies à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, grâce au cours de physique d'Emile Verdet<sup>496</sup>, et surtout au XX<sup>ème</sup> siècle chez les historiens des sciences tels que Pierre Duhem, Pierre Costabel et Monette Martinet<sup>497</sup>, et surtout August Ziggelaar.

Gaston Pardies ne cherchait pas la célébrité et était loin des querelles d'antériorité qui agitaient le monde scientifique à cette époque. Il a 'influencé' Newton, en désaccord avec lui mais qui apprécie son affabilité, Leibniz qui cite sa *Géométrie* et lui emprunte quelques-une de ses idées, Huygens qui lui doit une grande partie de sa théorie ondulatoire de la lumière, ainsi que Malebranche lorsqu'il écrit son *Mémoire sur la lumière et les couleurs*. Et si Euler ne le cite pas, Thomas Young lui emprunte, au début du XIX<sup>ème</sup> siècle, l'analogie entre la propagation ondulatoire du son et celle de la lumière<sup>498</sup>.

Gaston Pardies avait conçu, lorsqu'il enseignait à Bordeaux, un cours complet de mécanique qu'il avait le projet d'écrire et de publier en six traités. Les deux premiers sont parus, le *Discours du mouvement local* en 1670 et la *Statique ou la science des forces mouvantes* en 1673, peu avant sa disparition. La préface de la *Statique*, rédigée en 1672<sup>499</sup>, donne l'occasion à Pardies de présenter l'ensemble du cours de mécanique. En annexe du traité, Pardies ajoute un court article sur le tautochronisme de la cycloïde, dont la découverte est en général attribuée à Huygens qui en publie la théorie dans l'*Horologium oscillatorium* publié en 1673, après la *Statique* de Pardies. On sait toutefois que Huygens avait déjà fait état de cette découverte depuis longtemps. Pardies a voulu sans doute montrer qu'il avait redécouvert cette propriété sans le concours du célèbre savant hollandais.

Les deux traités suivants du projet de la *Mécanique* de Pardies devaient concerner le mouvement des corps pesants, ainsi que des fluides, le cinquième les vibrations et le dernier les mouvements d'ondulation. Voici la présentation qu'il fait, dans la Préface de la *Statique*, de ces deux derniers 'discours' qui ne paraîtront pas, du moins sous cette forme, en raison du décès prématuré de l'auteur<sup>500</sup> :

Le cinquième discours est du mouvement de vibration, c'est-à-dire de tous les corps qui font un mouvement réciproque allant et venant, comme font les pendules, les cordes tendues, les ressorts et plusieurs autres corps. L'on y décrit une pendule dont toutes les vibrations sont d'une égale durée ; l'on démontre aussi que toutes les vibrations d'une corde tendue durent également ; que les vibrations de deux cordes d'égale grosseur et également tendues sont en raison réciproque des longueurs des cordes, au lieu que dans les pendules elles sont seulement en raison sous-doublée ; que dans les cordes égales, les vibrations sont en raison sous-doublée des forces ou des poids qui les tendent ; que les vibrations sont encore en raison sous-doublée des grosseurs des cordes d'égale longueur, et également tendues. De sorte que l'on démontre par les causes tout ce que l'expérience nous fait remarquer dans les sons et dans l'harmonie des cordes tendues.

Le sixième discours est du mouvement d'ondulation. Sur l'exemple de ces cercles qui se font dans la surface de l'eau quand on y jette une pierre. On considère quelques semblables cercles qui peuvent se former dans l'air, et même dans quelque autre substance plus subtile, que de très manifestes expériences nous convainquent d'être présentes partout. Et c'est ce mouvement que nous appelons mouvement d'ondulation. Qui, servant de jeu et de divertissement aux enfants peut servir de sujet d'une très profonde méditation aux plus habiles philosophes. On examine donc comment ces cercles se peuvent former, comment ensuite leur mouvement se communique, quelles sont les lignes de leur direction, avec quelle force ils pourraient agir, près ou loin, comment ils se réfléchiraient et comment ils se rompraient ; et puis, supposant avec tous les philosophes, que le son a pour véhicule cette sorte de mouvement dans l'air, on explique tout ce qui concerne les sons ; et en faisant une conjecture sur la propagation de la lumière, on examine si l'on ne pourrait pas aussi supposer que la lumière eût pour véhicule quelque semblable mouvement dans un air plus subtil ; et l'on fait voir qu'en effet dans cette hypothèse, on expliquerait d'une manière très naturelle toutes les propriétés de la lumière et des couleurs qu'on a bien de la peine à expliquer sans cela ; et j'espère qu'on aura quelque satisfaction de la manière dont on y démontre la mesure des réfractions.

<sup>496</sup> Emile Verdet, *Cours de physique*, t 2, Masson, Paris, 1869, p.29-31.

<sup>497</sup> Pierre Costabel et Monette Martinet, 'Quelques savants et amateurs de science au XVII<sup>ème</sup> siècle', in *Cahiers d'histoire et de philosophie des sciences*, 14, 1986, pp. 49-56.

<sup>498</sup> Thomas Young, Outlines of experiments and enquiries respecting sound and light, in *Phil. Trans.* 1800, pp.106-150.

<sup>499</sup> Gaston Pardies, *La statique ou le science des forces mouvantes*, Sebast, Paris, 1673. Permission du R.P. Provincial, Jean Pinette : Le 16 août 1672. Privilège du roi : 19 octobre 1672. Achevé d'imprimer le 17 janvier 1673. Pardies est mort le 21 avril 1673.

<sup>500</sup> *Idem.*, Préface, p.11.



La distinction, que fait Pardies, entre mouvement de vibration et mouvement d'ondulation, est essentielle. Souvent associés, ces deux termes désignent bien, pour Pardies, deux notions différentes. La vibration, ou mouvement d'oscillation, est le mouvement d'un corps qui se déplace alternativement autour d'un point de repos, le pendule et les cordes vibrantes en sont les exemples les plus étudiés. On considère, dans ce cas, le déplacement mécanique de ce corps, et on détermine une nouvelle grandeur, le nombre d'oscillations dans un temps donné. Galilée est l'initiateur de la théorie des vibrations, et Huygens le grand théoricien.

Le mouvement d'ondulation, quant à lui, c'est le déplacement de la perturbation du milieu, provoquée le plus souvent par une vibration. C'est ce type de mouvement, non prévu par les philosophes jusqu'alors, qui obéit à des lois spécifiques, et dont on a surtout besoin pour expliquer la propagation du son.

En général, lorsqu'on cite Pardies à propos de la théorie des ondulations, c'est pour en faire l'un des promoteurs de la théorie ondulatoire de la lumière. C'est important, mais cette approche limitée, certes indispensable à l'Histoire des Sciences et sur laquelle on a beaucoup écrit, n'insiste pas suffisamment, et écarte même, la genèse de ce type nouveau de mouvement qui sera pourtant au centre des préoccupations des physiciens des siècles suivants. La propagation de la lumière n'est qu'une hypothèse 'applicative', parmi celles que Pardies évoque à propos du mouvement d'ondulation, sans doute en raison de l'intérêt pour le sujet à cette époque. Il est d'ailleurs probable que Pardies, qui s'intéresse également au magnétisme et à l'électricité, envisageait de leur attribuer le même type de mouvement, ainsi que peut-être à la pesanteur. C'est en tous cas ce qu'on peut comprendre par l'expression « ... avec quelle force ils pourraient agir, près ou loin ». Lorsqu'on parle d'une force qui agit de loin, à cette époque, on pense souvent au magnétisme. Un élément peut corroborer cette idée : il s'agit d'un cours de physique manuscrit de plus de 200 feuillets, rédigé par un élève de Pardies lorsqu'il enseigne à Bordeaux<sup>501</sup>. Le livre VI regroupe l'étude de plusieurs phénomènes associés dans une même explication. Pardies y décrit la cause de la pesanteur, de l'effet électrique et de l'attraction magnétique par des successions de « respirations et de transpirations ». Le jeune physicien avait l'intuition, encore très imprécise bien entendu, de la convergence des différents domaines de la physique, et de leur explication unique par un mouvement périodique. On retrouve d'ailleurs cette constante préoccupation d'associer la propagation de la lumière avec celle du son, et cette analogie puissante, qui n'a rien à voir avec celle de Kircher même si c'est chez lui que Pardies l'a découverte, est à la base de la théorie ondulatoire de la lumière. Il serait donc très réducteur de faire de Gaston Pardies uniquement un lecteur ordinaire de Hooke vaguement inspirateur de Huygens.

Le *Discours sur le mouvement d'ondulation* a finalement été rédigé, à partir des manuscrits de Pardies, par Pierre Ango, jésuite probablement collègue de Pardies et à ce titre détenteur d'une partie de ses écrits, qui en termine la rédaction en 1679, et le publie en 1682<sup>502</sup>. Le traité d'Ango a pour titre complet : *l'Optique divisée en trois livres où l'on démontre d'une manière aisée tout ce qui regarde : 1, La propagation et les propriétés de la lumière ; 2, La vision ; 3, La figure et la disposition des verres qui servent à la perfectionner*. La première partie, 128 pages, est donc probablement presque entièrement rédigée à partir du manuscrit de Pardies<sup>503</sup>, on y développe la théorie de l'ondulation, et la moitié du livre I est consacrée à la propagation des sons.

L'ouvrage est passé relativement inaperçu à sa parution, et lorsqu'on a compris, par l'article publié dans le *Journal de Trévoux* en 1726, qu'Ango avait recopié dans cette première partie, le traité de Pardies, le savant était, comme beaucoup de Jésuites, tombé en disgrâce auprès de la communauté scientifique, et tout le monde avait oublié ses démêlés avec sa hiérarchie et les savants du XVII<sup>e</sup> siècle. Cette relative indifférence pour la publication du livre d'Ango ne touche pas Huygens qui a sans aucun doute joué un rôle important dans l'histoire de la publication du traité de Pardies. En effet, il est une des dernières personnes à avoir eu entre les mains le manuscrit de Pardies, comme il en témoigne dans sa lettre du 24 juin 1673, deux mois après le décès du savant jésuite<sup>504</sup>. Par ailleurs, l'*Optique* a obtenu son 'privilege du roi' le 20 octobre 1679, et la publication est datée de 1682. Or on sait que Huygens a achevé la rédaction du *Traité de la lumière* vers 1679 et qu'il en avait présenté de larges extraits à l'Académie à partir de 1677. D'autre part, dans la préface, adressée à M... de l'Académie Royale des Sciences<sup>505</sup>, Ango écrit cette curieuse phrase :

<sup>501</sup> Raymond Dufour, *Scientiae contemplatricis quae est physiologia sive de natura rerum corporearum*, Ms 934, 225ff, Bibl. Mun. Bordeaux, cité par August Ziggelaar, *op. cit.* P. 70-73.

<sup>502</sup> Pierre Ango, *L'optique divisée en trois livres...*, Paris, E. Michallet, 1682.

<sup>503</sup> August Ziggelaar a fait l'étude détaillée des éléments qui montrent cette proposition. *Op. cit.* Chapitre XI, pp.170-206.

<sup>504</sup> Huygens, Correspondance, lettre n°1951, *op.cit.*

<sup>505</sup> En l'absence d'étude sur l'identité du destinataire, et à la lecture de cette préface, je pense qu'il s'agit justement de Huygens.

Je m'y suis servi de quelques-unes des pensées du feu Père Pardies qui vous paraîtront encore nouvelles, et qui sont en meilleure forme que ce père ne les avait laissées dans *les mémoires que vous savez que j'ai eu longtemps entre les mains*.

Ango, dans cet extrait, parle du livre premier, sur le mouvement d'ondulation. Au-delà des 'quelques pensées' qui constituent en réalité l'essentiel de cette partie du livre, on lit qu'elles pourraient être 'nouvelles' pour l'académicien. Cela suggère-t-il qu'Ango avait en sa possession d'autres pages ? En tous cas l'énigmatique dernière phrase laisse comprendre que le destinataire de cette préface connaît le cheminement de ce manuscrit. Une hypothèse serait à vérifier : celle d'un Huygens détenant une grande partie du manuscrit de Pardies, confiant à Ango le soin de le publier en sachant qu'il ne prenait pas de risque avec cet obscur auteur, et lui enjoignant d'attendre qu'il ait lui-même publié son *Traité de la lumière*, contrat qu'Ango, au bout de trois ans, n'aurait pas respecté dans sa totalité.

La grande idée de Gaston Pardies en ce qui concerne le mouvement d'ondulations est ce parallèle qu'il fait entre les propagations sonores et lumineuses. Dès sa correspondance avec Kircher, en 1661, Pardies est fasciné par sa théorie des rayons sonores qu'il lit dans *Ars magna lucis et umbrae*<sup>506</sup>, alors qu'il étudie les cadrans solaires. Ziggelaar fait état d'un recueil de thèses d'un élève de Paris au collège de Clermont en 1670 et 1671, un certain Alexandre Milon<sup>507</sup>. L'élève y décrit les théories que son professeur enseigne, et la thèse 5 présente justement cette analogie entre le son et la lumière<sup>508</sup> :

Le son est appelé 'le singe de la lumière' et le son est manifestement produit, formé et propagé par des ondes et des vibrations.

Mais lorsque Pardies s'inspire de Kircher, il a également lu Grimaldi, et la similitude des propagations ne s'inscrit plus dans une théorie du rayon sonore, mais au contraire, si l'on peut dire, dans une conception ondulatoire à la fois du son et de la lumière. Pardies invente la théorie du mouvement sans transport de matière déjà suggérée par tant d'autres, mais jamais explorée ni formalisée.

Pardies fait souvent référence au traité des vibrations qu'il a le projet d'écrire. Pour étudier correctement le mouvement d'ondulation, il a besoin d'abord de définir le mouvement de vibration<sup>509</sup> :

Après toutes ces suppositions que je viens de faire, pour me donner lieu de m'expliquer sur ce que j'ai à dire du mouvement d'ondulation d'une manière plus sensible, et pour faire mieux comprendre comment il est possible que l'air soit comprimé et dilaté, comme l'expérience le montre, je n'ai plus qu'une chose à ajouter qui regarde le mouvement de vibration, dont celui d'ondulation dépend, et dont il pourrait même en quelque façon n'être pas distingué, quoiqu'il soit plus à propos de le faire, comme on le concevra de ce qui sera dit dans la suite, et comme on le verra encore mieux dans le traité exprès que l'on pourra faire de ce même mouvement de vibration, où il y aura de très belles choses à dire.

Le traité exprès n'est pas un projet d'Ango, mais le discours sur les vibrations de Pardies, qui était sans doute en gestation à sa mort. La 'chose' qu'il a à ajouter, ce sont les propriétés du mouvement d'oscillation<sup>510</sup> :

Premièrement on sait que ce mouvement est propre des corps graves, liquides ou autres, quand ils sont en équilibre ou librement suspendus et que l'on a commencé de leur donner du mouvement.

Secondement, ceux qui ont quelque connaissance des principes de la mécanique, et qui savent que le mouvement est comme une seconde force qui est ajoutée à celle du poids et qui augmente toujours jusqu'au lieu où la pesanteur des corps les porte, conçoivent assez que les corps suspendus, comme ceux qui sont attachés aux pendules, après avoir été tirés du lieu où ils étaient auparavant en repos, le passent toujours en y retournant, en sorte qu'ils doivent même remonter presque aussi haut, après l'avoir passé, que le lieu dont ils étaient descendus pour y retourner.

<sup>506</sup> Athanase Kircher, *Ars magna lucis et umbrae*, Rome, 1646.

<sup>507</sup> Alexandre Milon, dont Ziggelaar ne trouve pas de trace lors de la rédaction de son livre sur Pardies, était originaire d'une famille de la noblesse de robe de Tours. Il deviendra secrétaire du Prince de Conti en 1694.

<sup>508</sup> Cité par August Ziggelaar, op. cit., p.181. L'expression 'singe de la lumière' (jeu de mot entre *simia* et *similis*) est empruntée à Kircher qui parle de l'ombre et de la lumière dans *l'ad lectorem de l'Ars magna lucis et umbrae* : *Lucis simiam umbra, modo umbrae simia lux reflexa agit*. Pardies se réfère à la théorie de Kircher sur la similitude entre son et lumière.

<sup>509</sup> Pierre Ango, *L'optique divisée en trois livres...*, Paris, E. Michallet, 1682, p.10.

<sup>510</sup> *Ibidem*, p.10-11.

Ils savent encore que cela se fait par la même raison qui fait que les corps qui sont en équilibre, comme sont par exemple deux colonnes d'eau d'égale hauteur, s'entre-élèvent réciproquement l'un l'autre quand un d'eux a une fois commencé à se mouvoir.

Enfin ils savent, et par l'expérience et par le raisonnement, que ces mêmes corps ne doivent pas s'arrêter aussitôt après qu'ils ont commencé à se mouvoir, parce qu'ils doivent être toujours réciproquement portés, pendant tout le temps que le mouvement dure, tantôt en deçà, tantôt au-delà du lieu de leur repos.

La troisième remarque, sur le 'tube en U', fera l'objet d'une étude particulière de la part de Newton dans les *Principia*, étude qui le conduit à élaborer sa théorie des ondes, sonores en particulier.

Maintenant que le mouvement de vibration est défini, Ango-Pardies fait la distinction avec les ondulations<sup>511</sup> :

Ce sont les allées et les venues qui portent et qui reportent réciproquement ces corps, tantôt en deçà et tantôt au-delà du lieu de leur repos, que l'on appelle le mouvement de vibration ; et le mouvement propre d'ondulation, comme est celui qui se fait dans les substances compressibles, suppose, outre cela, quelque compression et quelque dilatation des parties des corps où ce mouvement se passe.

Ango, et peut-être est-ce là un ajout de sa part, fait alors la comparaison avec le mouvement alternatif de contraction et de détente des muscles. En effet, si Pierre Ango se fait plutôt rare dans la littérature, on trouve çà et là dans la bibliographie les traces d'un Pierre Ango, professeur à Caen, qui intervient sur la physiologie du corps humain<sup>512</sup>.

Il semble, et Ango le dit, que Pardies, pour sa part, était plutôt adepte des 'ronds dans l'eau', et Ango en parle ainsi<sup>513</sup> :

Car c'est le mot usité maintenant parmi les philosophes de ce temps ; qui comparent les renflements et les compressions des parties de l'air, que demande Aristote [pseudo-Aristote, *problemata* XI, 6] pour la production du son, aux ondes que l'on croit s'élever sur la surface d'une eau bien tranquille lorsqu'on y jette une petite pierre ou qu'il y tombe une goutte de pluie ; Car ils prétendent que ces ondulations de l'eau peuvent beaucoup servir à faire comprendre toutes les propriétés de ce mouvement qu'Aristote appelle, au lieu que j'ai cité, un mouvement de secousse [de *anima* II, 8].

Le P. Pardies, dont j'avoue que j'ai tiré une partie de ce qu'il y a de meilleurs dans ce traité qu'il avait commencé peu de temps avant sa mort et qui m'est tombé ensuite entre les mains sans être achevé, parce qu'elle ne lui permit pas de digérer ses pensées sur ce sujet et de mettre la dernière perfection à son ouvrage, s'en sert lui-même avantageusement pour expliquer ses principales propriétés

Ensuite, les compressions et détente de l'air sont expliquées grâce à une autre métaphore, celle d'un ballon qui crève. Et voici ce que sont les ondulations dans l'air, succession de compressions et de détentes :

Car comme on le peut aisément comprendre de ce que je viens d'en dire, ce mouvement n'est proprement point un mouvement de transport ; ce sont des sphères d'air qui sont d'abord comprimées, et qui se remettent ensuite en leur premier état en la manière et par la raison que nous avons dite.

Suit une digression d'Ango qui réfute la comparaison des ronds dans l'eau, parce qu'elle laisse croire à un mouvement de l'eau. Mais justement, les adeptes de cette image l'utilisent parce qu'ils veulent modéliser ce type de déplacement sans transport de matière. Il arrive qu'Ango manque de finesse. Pardies reprend la parole<sup>514</sup> :

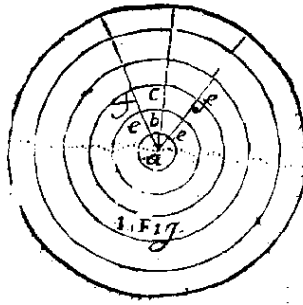
Car premièrement si nous voulons faire attention à ce que nous venons de dire, et considérer tout de nouveau comme les cercles qui s'élèvent sur la surface de l'eau ne sont produits que par l'agitation des parties de la même eau qui, sans s'éloigner du centre du mouvement qui est en a, communiquent leur agitation aux autres qui en sont plus éloignées ; nous reconnaitrons sans doute que cette communication d'agitation se doit toujours faire en ligne droite, et que la partie b par exemple ne la peut communiquer qu'à la partie c qui se trouve au-delà en ligne droite ;

<sup>511</sup> *Idem*, p.12.

<sup>512</sup> Journal des savants, juillet 1712, Compte-rendu d'ouvrage : *Question de médecine, Si l'homme vient d'un ver, dispute publique à la faculté de médecine de Caen, sous la présidence de Pierre Ango, professeur Royal*, Cavelier, Caen, 1711.

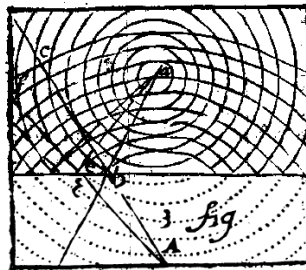
<sup>513</sup> Ango, *Id.*, p.14.

<sup>514</sup> *Id.*, p.20-21.



Voilà donc des lignes droites suivant lesquelles l'impulsion des parties de l'eau se communique, et comme elles partent toutes d'un même centre, vous voyez que l'on peut non seulement les considérer comme autant de rayons, mais encore qu'on peut déjà commencer à les appeler de ce nom.

Encore une fois, Newton va développer cette même théorie dans les *Principia*. A lire cette définition des rayons, on conçoit bien ce qu'il en est pour la lumière, encore que ces ondulations seraient d'un type particulier. Mais ici, Pardies parle des compressions et dilatations de l'air, c'est-à-dire du son. On doit comprendre qu'à l'instar de son maître Kircher, qu'il a beaucoup lu, il est un adepte des rayons sonores. Pourant, dans ce qui va suivre, il est sur une ligne radicalement opposée, du moins en ce qui concerne les réflexions des ondes<sup>515</sup> :



Le schéma est suffisamment clair, après une réflexion, le mouvement des ondes s'effectue en sens inverse, en répétant une propagation circulaire avec pour centre l'image du centre d'ondulations initial. Pour Pardies, le mouvement d'ondulation se fait par une progression de perturbation circulaire, mais dont la direction est radiale<sup>516</sup> :

Comme on le voit sur la figure, où il paraît que, le bord du vase étant droit, les cercles des ondulations réfléchies devraient suivant cette règle, passer par-dessus les autres, et les croiser régulièrement tous comme s'ils étaient partis du centre A qui est un centre aussi éloigné du bord du vase qui est celui des ondulations directes qui se font dans les mêmes vases.

Et il ne faut point s'imaginer ici que ces cercles se dussent mutuellement détruire. Car ce ne sont point des mouvements de parties qui soient transportées, et après ce qu'on a dit de la manière dont ils sont formés, la seule expérience que l'on a de ce qui se passe ici à l'égard de ces mêmes cercles doit persuader de ce que l'on pourrait établir par quantité d'autres expériences semblables qui montrent que le même corps qui dans le même temps n'est capable que d'un seul mouvement est cependant capable de recevoir en même temps quantité d'impressions différentes qui agissent toutes différemment pour le produire.

L'expérience donc montre ici qu'en effet la surface de la liqueur est diversement agitée par les cercles des ondulations directes et réfléchies, et que celles-ci passant comme par-dessus les autres y marquent leurs cercles sans effacer les autres qu'ils laissent aller suivant leur direction, pendant qu'ils suivent eux-mêmes la leur qui lui est entièrement opposée.

Pardies décrit ici la superposition de deux systèmes d'ondes lors de leur croisement, ce qu'avait déjà écrit Grimaldi dans de chapitre sur le son de sa *Physico Mathesis de lumine*. Le phénomène est abstrait, et Pardies-Ango parvient assez bien à décrire le résultat de plusieurs 'impressions' faites sur le corps qui subit le

<sup>515</sup> Id.p.26.

<sup>516</sup> Id., p.27.

mouvement d'ondulation. Ce corps va, certes, effectuer un mouvement local, de vibration, un peu complexe, mais chaque mouvement d'ondulation demeure identique, et poursuit sa progression.

On passe ensuite aux cas particuliers<sup>517</sup> :

Si le vase où l'eau est renfermée était de figure elliptique et que les ondulations commençassent à se former autour de l'un de ses foyers a toutes les réflexions se feraient vers l'autre foyer b, s'il était parabolique les cercles réfléchis dégénéreraient en lignes droites perpendiculaires à l'axe, et s'il était hyperbolique, les ondulations réfléchies feraient des cercles concentriques qui augmenteraient perpétuellement comme s'ils étaient venus de l'autre foyer b de l'hyperbole ; d'où l'on voit comment on pourrait trouver le moyen d'augmenter et de diminuer la force de ces ondulations, puisqu'elle s'augmente en effet dans l'ellipse où leurs cercles vont toujours en se rétrécissant, qu'elle demeure la même dans la parabole ou ils ne s'élargissent ni ne se rétrécissent, et qu'elle se diminue au contraire dans l'hyperbole.

L'interprétation géométrique est un peu idéalisée, mais le traitement de ces cas particuliers par Pardies (Ango avoue à plusieurs reprises ses lacunes en géométrie) est beaucoup plus cohérent et conforme à la réalité que les théories développées par les savants jésuites avant 1660, et dont la démesure culmine avec Kircher.

## ***La propagation du son à l'Académie Royale des Sciences***

Revenons 20 ans en arrière, à Paris, les savants s'étaient regroupés, à l'initiative de Colbert, dans l'Académie des Sciences, créée en 1666. Dix ans plus tard, les académiciens sont assidus aux séances, le samedi pour les 'mathématiciens', le mercredi pour les 'physiciens'. Les mathématiciens comprenaient également les astronomes et les physiciens de la mécanique, les autres rassemblaient les chimistes, les naturalistes (botanique, zoologie, médecine, géologie) et les physiciens de la matière. Parmi les premiers on trouve Roberval, Auzout, Cassini, Picard, Huygens, Römer et de la Hire, et les seconds sont représentés par Perrault, Mariotte, Pequet, Dodard, du Verney et Marchand, notamment.

La démarche des académiciens est essentiellement basée sur l'observation, en particulier au moyen des instruments d'optique qui ne cessaient d'accroître leurs performances, comme les lunettes pour l'astronomie, et les microscopes pour les sciences naturelles. Ce sont donc les deux disciplines qui se développent au sein de cette Académie, avec également une grande importance accordée aux recherches théoriques en mathématiques et en mécanique. L'étude du son, pas encore nommée acoustique, n'y trouve pas vraiment sa place, mais on relève, dans les procès verbaux de l'Académie des Sciences, un compte rendu de la visite du Grand Dauphin en date du 23 mars 1677, au cours de laquelle il « fit l'expérience des trompettes à porter la voix »<sup>518</sup>.

On ne peut pas dire que la nature physique du son soit une grande préoccupation de l'Académie Royale des Sciences à la fin du XVII<sup>e</sup> siècle. Celle-ci a été créée en 1666, à l'instigation de Colbert, et il convient pour les savants de chercher des applications pratiques et si possible à usage militaire, à leurs découvertes. Les mathématiques et surtout l'astronomie sont les deux disciplines de recherche fondamentale épargnées par le souci d'efficacité de la tutelle étatique, sans doute pour des raisons de prestige international. Les travaux de Mariotte trouvent sans problèmes des applications, comme ceux de Cassini en cartographie ainsi que ceux de Huygens, en horlogerie ou sur la marche des bateaux. Les recherches en optique ont bien entendu toute leur place. En revanche, l'acoustique ne produit pas beaucoup d'applications, si ce n'est peut-être le développement du porte-voix récemment inventé en Angleterre. Cette fois, ce sont nos académiciens qui ne se passionnent pas pour l'invention, et elle trouvera ses développeurs parmi les savants amateurs comme Cassegrain, Denys ou Hautefeuille.

Cependant, en plus des quelques bribes de recherches qu'entreprennent Blondel, de la Hire ou Huygens, quelques académiciens s'intéressent aux sons comme du Verney pour la physiologie de l'oreille, Joseph Sauveur pour l'acoustique musicale, et Claude Perrault qui consacre un tome entier de sa *Physique* à la nature du son.

### **Claude Perrault et le bruit**

Parmi les premiers académiciens Claude Perrault dispose d'un statut privilégié. C'est un médecin de formation, qui s'est, par la suite, tourné vers l'architecture, en particulier lors de la délicate traduction des œuvres de Vitruve. En bonnes relations avec Colbert, il est chargé de la construction de l'observatoire et responsable des bâtiments royaux. Mais à l'Académie des Sciences, c'est vers l'histoire naturelle qu'il se tourne avec un long travail sur l'anatomie et la description des animaux.

<sup>517</sup> *Id.*, p.29-30.

<sup>518</sup> Académie Royale des Sciences, *procès verbaux des séances*, 1675-1679, 23 mars 1677.

En 1675, le roi commande à l'Académie des sciences un ouvrage de physique qui recenserait les connaissances du moment. C'est Colbert qui en fait la demande à Perrault, qui communique cette commande à l'Académie. L'*Essai de physique* de Perrault en 9 traités réunis en 4 volumes, qui paraît en 1680, est la réponse à cette demande. Le septième traité est intitulé '*Du bruit*', le sujet en est la production et la propagation des sons. Perrault, devenu physicien, l'écrit vraisemblablement en 1677, et commence sa lecture au cours des séances de l'Académie le 1<sup>er</sup> décembre de cette année.

## MATHEMATIQUE.

### MECHANIQUE.

**L**E Roi voulut que l'Académie travaillât incessamment à un Traité de Méchanique, où la Théorie & la Pratique fussent expliquées d'une manière claire & à la portée de tous; on devoit cependant séparer de la Théorie tout ce qui pouvoit appartenir de trop près à la Physique, tout ce qui pouvoit faire naître de la dispute, on devoit la renfermer dans une espèce d'Introduction à tout l'Ouvrage. On décriroit ensuite dans l'Ouvrage même toutes les Machines en usage dans la Pratique des Arts, soit en France, soit dans les Pays Etrangers.

Ce fut ce que M. Colbert fit sçavoir par M. Perrault à l'Académie, le 19. Juin de cette année. La Compagnie fit dans le cours de quelques Assemblées ses Réflexions sur ce sujet; & M. Du Hamel fut chargé de rendre compte à M. Colbert du Résultat des Ecrits de chacun. MM. Picard, Hughuëns, Mariotte & Blondel travaillèrent de concert aux Préliminaires; MM. De Roberval & Roëmer traitèrent aussi cette Matière en particulier; on chargea M. Buot de dresser le Catalogue des Machines, & d'en faire faire les Dessins; on lui donna pour aides M. Couplet, & MM. Pasquier & Du Vivier.

A l'Académie des sciences, Perrault fréquente Mariotte, Roemer et surtout Huygens qu'il invite souvent dans la propriété familiale de Viry. Ces savants ont des vues précises sur la structure de la matière et de l'air. Roemer découvre que la lumière n'est pas instantanée, en remarquant des particularités dans l'observation de Jupiter et de ses satellites, selon la distance de la planète à la terre. Huygens développe sa théorie ondulatoire de la lumière dans sa '*Dioptrique*' dont il lit des passages aux séances de 1679. Mariotte est en quelque sorte un spécialiste de l'air et du vide, il apporte son aide à Perrault pour envisager le son comme un mouvement de particules d'air. On peut citer également, parmi ses relations, Du Verney qui a écrit un mémoire sur la structure de l'oreille en 1676.

Le *Traité du bruit* est un ouvrage conséquent, composé de trois parties et d'un traité sur la Musique des Anciens. L'ensemble compte 400 pages, et Perrault traite de la physique des sons, de l'acoustique musicale, et de la physiologie de l'audition.

Perrault révoque, dès le second chapitre, l'analogie des ronds dans l'eau<sup>519</sup> :

Pour expliquer un peu mieux par cette hypothèse la manière dont l'air, agité par les corps qui se choquent, produit et fait continuer cette agitation jusqu'à une très grande distance, les Anciens et les Modernes disent que l'air, divisé et coupé par le choc de deux corps, fait des ondes qui se continuent jusqu'à l'organe de l'ouïe, de la même manière que l'eau d'un lac qui, étant divisé par la chute d'une pierre proche de l'un de ses bords, fait des ondes qui se continuent jusqu'à l'autre bord qu'elles vont frapper.

Cette comparaison est fort spécieuse, car elle fait clairement entendre comment un corps fluide, étant poussé, fait passer fort loin l'effet de cette impulsion, quoique obéissant comme il fait au choc qu'il reçoit; il ne semble pas être capable d'en continuer l'effet comme ferait un corps

<sup>519</sup> Claude Perrault, *Essais de physique*, t II, *Traité du bruit*, Coignart, Paris, 1680. Partie I, chapitre 2, pp.10-16.

solide, tel qu'est un bâton, qui, étant poussé par un bout, pousse par l'autre de la même manière qu'il a été poussé par la partie opposée.

Car l'impulsion faite à l'eau continue ainsi son effet, parce que l'eau qui s'élève autour de la pierre qui la divise, pousse, en se rabaissant, l'eau voisine et la fait élever, et cette partie de l'eau élevée, en retombant ensuite, en fait élever une autre ; ce qui se continue fort loin, et après avoir diminué par degrés, cesse enfin tout à fait.

Perrault n'est pas poète. On lui dit que le son se propage comme les ronds dans l'eau, et au lieu d'envisager le propos comme une image, il entreprend de décortiquer le phénomène. C'est tout à fait la démarche des scientifiques du XVII<sup>e</sup> siècle, qui refusent de se laisser abuser par des histoires dont on ne sait plus si elles sont des représentations symboliques ou des analogies, au sens de phénomènes obéissant aux mêmes lois mais dans un domaine différent. L'histoire des représentations tourne beaucoup autour de cette ambiguïté.

Perrault décrit d'abord, objectivement, la métaphore, puis il assène un premier obstacle. Est-ce que la force initiale, celle qui pousse les ronds, est capable d'être restituée lorsqu'elle touche la rive ? Pour Perrault, c'est clair, c'est impossible, un fluide qui transforme une poussée en vagues ne peut pas pousser un corps à son extrémité comme le ferait un solide. Il en donne la raison, la force est dissipée dans les différentes montées de l'eau dans ces cercles, qui ne sont pas compensées par les descentes, et l'effet finit par cesser après son affaiblissement. Bien sûr Perrault ne dit pas cela textuellement, mais la dernière phrase explique tout, puisque si la force était conservée, il n'y aurait pas d'atténuation.

Ensuite Perrault décline ses objections<sup>520</sup> :

Premièrement, la division de l'air que l'on suppose est une chose absolument opposée à ce qui est requis pour l'effet dont il est question : car l'air a une si grande fluidité que lorsqu'il est poussé, il se fend et se divise aisément ; en sorte que les parties poussées, au lieu d'en pousser d'autres devant elles, se retirent derrière le corps qui les pousse. Il est évident que la divisibilité de l'air nuit absolument, au lieu d'être favorable, à l'impulsion et à la continuation du mouvement d'une partie de l'air à l'autre, ce qu'il faut nécessairement supposer dans le bruit.

La référence à l'air qui est divisé lors de la propagation du son se trouve à la fois chez les Scolastiques qui le répètent constamment, mais également chez Rohault, pourtant cartésien, et dont le *Traité de physique* est très lu à cette époque<sup>521</sup> :

[...] l'air doit trembler et bouillonner, et même, en sautant, se diviser en un nombre innombrable de petites masses qui se meuvent d'une très grande vitesse en tremblant et en se froissant les unes et les autres.

Il est clair que l'argument de Perrault n'est pas dénué de fondement. Le second argument est plus finement abordé :

En second lieu, cet ondolement ou frémissement, que l'on se figure se faire dans l'air ainsi qu'il se fait dans l'eau, est une chose qui ne paraît pas possible. L'ondoiement suppose que le corps où il se fait a une surface plate, sur laquelle un autre corps, plus léger et plus subtil, est étendu ; en sorte que ce dernier suit les mouvements d'élévation et de dépression qui se font à la surface du corps ondoyant ; et cette surface est la seule partie qui est capable d'ondoiement. Or, rien de cela ne se trouve dans l'air, qui n'est pas capable non plus d'ondoiement que la partie de l'eau de la mer située au-dessous de l'espace au-delà duquel l'enfoncement des plus grandes vagues ne peut parvenir : et il semble que cette partie de la mer est, par cette raison, semblable à l'air qui nous environne, et dans lequel nous sommes comme plongés. Car il n'y a personne qui puisse concevoir que, si l'on faisait, au fond de la mer, une impulsion capable de causer des ondolements si elle était faite en sa surface, cette impulsion se put faire ni se continuer et porter son effet bien loin, comme elle le ferait par le moyen des ondolements qui se font en la surface ; parce que les causes de l'ondoiement ne se rencontrent point en cet endroit.

Dans le cas des ondes sur l'eau, ces déformations n'affectent que la zone de transition entre les deux milieux, et c'est la différence de nature de ces milieux, l'un est compressible, l'autre non, qui crée les ondes. Et Perrault introduit la notion d'élasticité de l'air, qui provoque un mouvement alternatif autour de la position de repos :

Pour faire valoir cette comparaison, on pourrait dire que la vertu élastique de l'air, qui fait qu'il peut être comprimé et ensuite revenir en son premier état, ainsi que fait un ressort, lui peut faire faire quelque chose de semblable à l'ondoiement de l'eau, lorsque étant comprimé par

<sup>520</sup> *Ibidem*.

<sup>521</sup> Jacques Rohault, *Traité de physique*, 1671, ed. Guillimin, Lyon, 1696, p.278.

l'impulsion, cette vertu élastique le fait non seulement retourner en son premier état, mais elle le fait même passer plus loin : car cela peut causer une réciprocation capable de faire qu'une impulsion, n'agissant immédiatement que sur un endroit, elle passe de là à un autre, et par ce moyen, se continue fort loin.

C'est la propriété d'élasticité de l'air qui fait les ondulations à la surface de séparation des milieux. Le troisième argument introduit l'un des problèmes les plus difficiles de la propagation des sons, la conservation du timbre, qu'on appelle, espèce ou forme du son :

[...] je dis en troisième lieu que le mouvement d'ondoiement, causé dans l'air par son ressort ou autrement, supposé que l'air soit capable de cette espèce de mouvement, n'est point propre à expliquer les causes du bruit, parce qu'il produirait un effet tout à fait contraire à ce qui arrive dans le bruit : car le propre des causes du bruit est de faire que l'agitation de l'air lui fasse frapper l'oreille de la même manière que les corps qui font du bruit se frappent l'un l'autre, c'est-à-dire que quand les corps qui font du bruit se frappent dix fois, on entend dix coups, et que quand ils ne se choquent qu'une fois, on n'entend qu'un coup. Or cela n'arrive point dans l'agitation qui, par le mouvement d'ondulation, est transportée d'un lieu à un autre : car une pierre qui, étant jetée dans un étang, ne frappe l'eau qu'une fois, fait que les ondes vont frapper les bords cinquante fois.

En effet, l'ondoiement de l'eau ne respecte pas cette propriété essentielle du son qui est la conservation de la forme du son, ni en qualité, ni en quantité, de sa production à sa réception.

Et Perrault conclut par cette nuance importante :

Je sais bien qu'on m'objectera que le son qui, dans les corps résonnants comme une cloche ou les cordes d'un luth, se conserve longtemps, quoique ces corps n'aient été frappés qu'un coup, ne se peut expliquer que par la raison de l'ondoiement et j'en demeure d'accord : mais je dis que ce n'est point l'ondoiement de l'air qui fait cet effet dans les corps résonnants, mais que c'est l'ondoiement des corps même.

Et en effet, c'est très important, car cela signifie que ce sont les vibrations des corps, même lorsque l'impulsion initiale a cessé, qui causent le son, mais non les ondulations qui seraient portées pendant un certain temps dans l'air. C'est en effet différent de ce qu'on voit sur les ondes de l'eau qui continuent à se propager, alors qu'il n'y a plus aucune vibration pour entretenir le mouvement.

Perrault expose ensuite sa théorie selon laquelle les vibrations spécifiques des corps sonores communiquent la même forme de vibration à l'air qui les propage jusqu'à l'oreille.

Comment ce phénomène peut-il se produire ? Grâce à une hypothèse de constitution de la matière, et particulièrement de l'air, Perrault parvient à répondre au problème.

Fontenelle, qui a rédigé cette partie de *l'Histoire de l'Académie Royale des Sciences* qui concerne ses débuts de 1666 à 1699, fait un résumé de la théorie de Perrault sur le son, à l'occasion de la lecture de l'ouvrage en séance, en 1677.

Claude Perrault établit sa physique des sons au moyen d'une modélisation qui repose sur deux entités composant la matière, et en particulier pour le son, l'air. Il leur donne le nom, respectivement de parties et de particules. Les particules sont, dans l'ensemble, assez semblables. Leurs assemblages forment les parties qui elles, peuvent prendre des formes très diverses, selon la matière et les conditions d'environnement. Tout ceci est en mouvement. On voit qu'on est dans une théorie de la matière cartésienne, mais plutôt teintée d'atomisme. Les particules sont dotées de la propriété de faire ressort, et leurs mouvements peuvent être très rapides.

Le son se distingue du vent en ceci : les particules animées d'un mouvement très rapide dans un petit espace, en vertu de leur ressort, communiquent ce mouvement aux parties, à la fois à celles dont elles sont les éléments, ainsi qu'à celles qui sont adjacentes. Ce mouvement, des parties cette fois, se communique aux parties de l'air voisines et propagent ainsi le son qui est une agitation des particules ; le vent, quant à lui, n'est qu'un mouvement des parties de l'air, dont les particules n'ont pas de mouvement spécifique.

Perrault réussit la synthèse entre le courant corpusculaire cartésien et le courant ondulationniste qui se constitue à ce moment. Son *Traité du bruit* a été rapidement éclipsé par les *Principia* de Newton qui modélisaient la propagation du son d'une façon plus mathématique et donc plus acceptée par la communauté scientifique.

## Huygens et les ondes

Curieusement, le seul qui aurait pu entreprendre des recherches sur la nature physique du son est Huygens, parce qu'il a déjà touché à l'acoustique musicale, et qu'il travaille sur la théorie des ondes et des vibrations. Mais le savant semble éviter cette question, par exemple, en réponse à Oldenburg qui le questionne à



plusieurs reprises sur la meilleure forme à donner à la ‘trompette parlante’, Huygens répond et montre son désintérêt pour la question du porte-voix qui pourtant passionne les savants à cette époque<sup>522</sup> :

Le problème touchant la meilleure figure pour cette trompette serait difficile à résoudre, et il faudrait auparavant avoir bien des connaissances en ce qui regarde la nature du son, que nous n'avons pas encore.

Il faut attendre la publication en 1690 du *Traité de la lumière* pour que Huygens fasse une courte allusion à la propagation du son par des ondulations. Cependant, cet extrait, déjà cité, résume assez bien la conception que Huygens a du son. En revanche, s'il propose une modélisation pertinente, il n'en explore pas les conséquences quant aux différentes propriétés du son<sup>523</sup> :

Nous savons que par le moyen de l'air, qui est un corps invisible et impalpable, le son s'étend tout à l'entour du lieu où il a été produit, par un mouvement qui passe successivement d'une partie de l'air à l'autre, et que l'extension de ce mouvement se faisant également vite de tous côtés, il se doit former comme des surfaces sphériques, qui s'élargissent toujours, et qui viennent frapper notre oreille. [...] Je les appelle ondes à la ressemblance de celles que l'on voit se former dans l'eau quand on y jette une pierre, qui représentent une telle extension successive en rond, quoique provenant d'une autre cause, et seulement sur une surface plane.

Huygens adopte la dénomination d'onde pour désigner ce type de mouvement qui passe successivement d'une partie de l'air à l'autre. Il se réclame volontiers de l'analogie avec les ronds dans l'eau, même si elle lui semble approximative. Sa description du mouvement des corps dans l'air se fait plus précise, et Huygens introduit la notion de compressibilité et d'élasticité de l'air<sup>524</sup> :

[...] on considère que l'air est de telle nature qu'il peut être comprimé et réduit à un espace beaucoup moindre qu'il n'occupe d'ordinaire; et qu'à mesure qu'il est comprimé, il fait effort à se remettre au large : car cela, joint à sa pénétrabilité qui lui demeure nonobstant sa compression, semble prouver qu'il est fait de petits corps qui nagent et qui sont agités fort vite dans la matière éthérée composée de parties bien plus petites. De sorte que la cause de l'extension des ondes du son, c'est l'effort que font ces petits corps qui s'entrechoquent à se remettre au large, lorsqu'ils sont un peu plus serrés dans le circuit de ces ondes qu'ailleurs.

Par ailleurs, on a quelques traces manuscrites sur des recherches inabouties de Huygens sur la nature physique du son<sup>525</sup>. Ces fragments concernent les vibrations des cordes, des lames métalliques, le son dans les flûtes, mais sont très succincts. Un manuscrit de 1674 se présente comme un sommaire d'une étude plus approfondie jamais réalisée<sup>526</sup> :

Que le son se fait par la perception du mouvement de l'air par l'oreille.

Que le son vient d'un tremblement réglé de l'air. Que ce tremblement doit être d'une certaine vitesse pour le moins.

Que la force du son dépend de la quantité d'air qui est mu et que, à cause de cela, une corde tendue sur un clavecin ou sur un luth a bien plus de son que tendue sur une muraille parce que toute la table du clavecin ou du luth tremblent avec la corde et tout l'air enfermé et qui est autour. Comment ces tables peuvent trembler de plusieurs façons à la fois en faisant sonner plusieurs cordes ensemble.

Que le son est nul dans le vide d'air.

Que l'air fait ressort et se meut successivement par le son.

De la conduite du son par tuyaux et par voûtes.

De la réflexion du son.

De la vitesse de la propagation du son. Comparer cette vitesse avec celle qu'il faut pour produire le son.

Du tonnerre.

<sup>522</sup> Huygens, Correspondance, in *Œuvres complètes*, Ed. Nationale Hollandaise, Nijhoff, La Haye, 1937, t. 7, Lettre N° 1866, Huygens à Oldenburg, 13 février 1672.

<sup>523</sup> Christiaan Huygens, *Traité de la lumière*, in *Oeuvres complètes*, La Haye, Nijhoff, 1937, t. 19, p. 463.

<sup>524</sup> *Idem*, p. 471.

<sup>525</sup> Ces manuscrits ont été regroupés au XX<sup>ème</sup> siècle par les éditeurs hollandais de Huygens. Christiaan Huygens, *Oeuvres complètes*, Ed. Nat. Hollandaise, Nijhoff, La Haye, 1937, t. 19, 'Le son', pp.353-378.

<sup>526</sup> *Idem*, p.370-371.

Que le son se communique à travers l'eau, quoique faiblement. Qu'elle doit faire ressort.

Ce programme a tout pour faire un livre, et il est dommage que Huygens ne l'ait pas entrepris. Cependant cette liste ressemble au plan de l'ouvrage que Perrault, ami de Huygens, va entreprendre de rédiger trois ans plus tard. On y retrouvera l'expression 'l'air qui fait ressort', ainsi que la notion de vitesse propre des parties d'air lors de leur tremblement. On note l'intéressante question de la vibration composée de la table du luth, question peu souvent abordée. Le dernier problème est également intéressant, la démarche de Huygens est celle-ci : puisque le son est un tremblement causé par le ressort des parties du milieu de propagation, si celui-ci est l'eau, alors l'eau est capable de ressort, ce qui est en contradiction avec les observations courantes. Ce qui pose un problème à Huygens, qu'il ne résout pas. Mais on comprend la démarche de pensée du savant qui, pour chaque proposition énoncée, évalue toutes les conséquences, et qui se propose d'en vérifier la validité.

Le Traité de la lumière est publié en 1690, mais il a fallu plus de quinze ans au savant pour formaliser sa théorie ondulatoire de la lumière. On sait qu'il s'est inspiré, lors de l'élaboration de cette hypothèse, du traité des ondulations de Pardies qu'il avait eu entre les mains. C'est sans doute là qu'il a puisé pour proposer son analogie entre la propagation de la lumière et celle du son. C'est qu'en effet, depuis Pardies, les termes sont inversés, et ils le seront pour longtemps. En 1690, c'est clair, le son est modélisé sous forme d'ondes de compression de l'air.

On trouve également dans ce recueil les notes de Huygens à propos de l'expérience de Viry sur la mesure de la vitesse du son par l'écho, ainsi que celle de Chantilly sur l'écho renvoyé par les marches de l'escalier.

En effet, parmi les quelques expériences concernant la propagation du son que Huygens a effectuées, on retient celle de Chantilly en 1680, qu'il relate plus tard dans une communication à l'Académie. Voici, les extraits des notes manuscrites prises à l'occasion de cette expérience<sup>527</sup> :

24 Nov. [1680]. Esté à Chantilly . . . Cascade de la riviere de 9 pieds de haut, 15 pieds de large, au bout du Canal à l'hexagone. Echo de la gerbe d'eau du parterre contre les marches du grand escalier de la terrasse, fait un ton comme d'une trompette de loin, ce qui vient des echos successifs des marches du degré qui ont 17 pouces de large. Il me semble qu'il y a 45 marches ou environ . . . 3 Dec. Retourné à Chantilly, l'escalier estoit plein de neige qui couvroit les marches jusqu'à la moitié de leur hauteur. le son ne s'y entendoit plus du tout.

Un tuyau de 17 pouces en soufflant dedans fait le mesme ton que l'echo de l'escalier, ce qui prouve mon sentiment, parce que ces 17 pouces sont la largeur des marches. . . . .

Cette expérience a fait l'objet d'un récit écrit par Pierre Costabel à l'occasion de la publication des actes d'un colloque, *Huygens et la France*, tenu à Paris en 1982<sup>528</sup> :

D'après les notes manuscrites qu'il [Huygens] a laissées à ce sujet, il est aisé de juger que ce n'est pas lui qui découvrit le phénomène curieux dont il va être question. Il en avait entendu parler et c'est peut-être pour le constater lui-même qu'il fit le 24 novembre 1680 le déplacement de Paris à Chantilly. Il fut heureux de vérifier qu'on ne l'avait pas trompé. La gerbe d'eau du parterre étant en fonctionnement, il entendit effectivement, étant placé au pied de l'escalier, « une résonance qui a un certain ton de musique, comme d'une trompette de loin ». « On ne savait pas, dit-il, d'où venait ce son, ou on en disait des causes peu vraisemblables, ce qui me donna envie d'en chercher de meilleures ».

Il est probable qu'en venant à Chantilly le jour ci-dessus indiqué il avait déjà réfléchi à la question et pensé aux échos successifs sur les parties verticales des marches. Sur place, il prit la mesure de la largeur des marches (17 pouces), puis revenu dans son laboratoire, il fabriqua rapidement un tube fermé par un bout et de 17 pouces de long. « En soufflant dedans, dit-il, on obtient le même ton que l'écho de l'escalier ».

Huygens retourna à Chantilly le 3 décembre, évidemment pour confirmer le résultat, mais il avait neigé. « La neige couvrait les marches jusqu'à la moitié de leur hauteur et le son ne s'entendait plus du tout ». Du moins y avait-il là confirmation du rôle fondamental de l'écho.

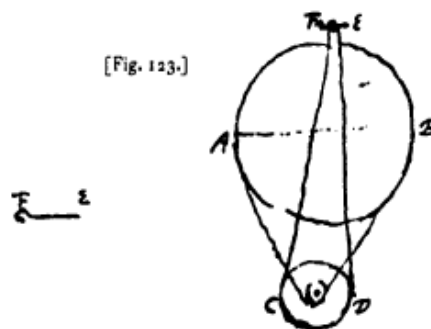
<sup>527</sup> *Id.* p.374.

<sup>528</sup> Pierre Costabel, 'Huygens et la mécanique'(annexe),in *Huygens et la France*, Paris, Vrin, 1982, p.149-150.

Si le grand physicien quitta la France - quelques mois plus tard - sans trouver l'occasion de revenir à Chantilly et d'achever son expérimentation, du moins fournit-il à l'Académie, dans une lettre de novembre 1693, toute précision utile sur l'analyse qu'il avait faite du phénomène.

« Chaque bruit tant soit peu distingué, dit-il, qui vient de la fontaine, étant réfléchi contre les marches doit arriver à l'oreille, de chacune des marches, d'autant plus tard qu'elle est plus éloignée et cela par des différences de temps justement égales à celui que les ondoiements de l'air emploient à aller et venir autant qu'est la largeur de la marche. »

Huygens semble s'intéresser, au début des années 1680 à la notion de longueur d'onde. Une autre expérience est encore plus significative. Elle est datée de l'hiver 1682 par Vollgraff, l'éditeur des œuvres de Huygens en 1937. Cette expérience concerne la détermination de la fréquence d'un son et l'introduction, par une remarque de Huygens, de la notion de longueur d'onde. Il s'agit ici de notes manuscrites que Vollgraff a extraites de la masse de documents laissés par Huygens. Les explications sont confuses, et il est nécessaire d'interpréter. Huygens est en pleine expérimentation, il tâtonne, prend des notes, et envisage même des erreurs d'expériences<sup>529</sup> :



Dum rota AB [Fig. 123] semel convertitur atque insuper pars circumferentiæ æqualis  $3\frac{3}{10}$  pollices, rota CD duodecies convertitur. Dumque hæc semel, axiculus FE 53<sup>es</sup> volvitur.

Penduli cujus longitudo pedalis minus  $\frac{1}{60}$  pedis singulæ oscillationes duplices respondebant singulis revolutionibus rotæ AB.

Tumque sonum edebat axiculus FE, quem D seu Re clavecymbali mei, qui tono uno est altior tono campanæ majoris in Templo S. Jacobi dicto \*) ad forum nostrum Hagienfæ, hujus enim tonus concordat cum C clavecymbali seu Vt.

Diameter rotæ AB pes 1, uncia  $11\frac{8}{10}$ , sive AB 2 pedum minus  $\frac{2}{120}$  sive  $\frac{1}{60}$ .

Ergo<sup>3)</sup> dum semel vertitur rota AB, fiunt  $11\frac{1}{2}$  circuitus rotæ CD. et 609 circuitus axiculi FE. Hinc singulis secundis scrupulis fient axiculi FE circuitus 547.

Tandis que la roue AB a tourné une fois comme une partie de circonférence égale à  $3\frac{3}{10}$  de pouces[\*], la roue CD a tourné douze fois. Tandis qu'une fois de celle ci fait tourner le petit axe FE 53 fois.

Aux révolutions de la roue AB prises une à une correspondent les oscillations doubles d'un pendule dont la longueur est d'un pied moins  $\frac{1}{60}$  de pied.

Alors le petit axe FE produisait un son, qui est le 'ré' de mon épinette, qui sonne un ton au-dessus de la cloche du temple St Jacob sur notre place de La Haye, qui elle même correspond donc au 'do' de mon épinette.

Le diamètre de la roue AB est d'un pied, [Pas de traduction pertinente pour le reste de la phrase : « ...uncia 11  $\frac{8}{10}$ , sive AB 2 pedum minus  $\frac{2}{120}$  sive  $\frac{1}{60}$ .]

[ici figurent des calculs que l'éditeur du manuscrit, Vollgraff, n'a pas repris]

Donc, pendant que la roue AB fait un tour se produisent  $11\frac{1}{2}$  tours de la roue CD et 609 tours du petit axe FE. Par conséquent, en une seconde, l'axe FE fait 547 tours. (traduction personnelle)

[\*] Il y a probablement une erreur à la seconde ligne, il faut lire : 'AB parcourt 3 et  $\frac{3}{10}$  pieds', et non 'pouces' (pollices, devraient être pedes, un pied vaut douze pouces). En effet, à cette

<sup>529</sup> Christiaan Huygens, *Oeuvres complètes*, Ed. Nat. Hollandaise, Nijhoff, La Haye, 1937, t 19, 'Le son', pp.375-376.

condition, on a bien, pour un diamètre de AB égal à un pied, soit une circonférence de 3,14 pieds, CD qui fait 11,5 tours, et donc FE fait 609 tours.

Interprétation proposée : un tour d'une partie de circonférence égale à 3,3 pieds de la roue AB fait tourner CD douze fois, et un tour de CD fait tourner EF 53 fois, soit 636 tours de EF pour 12 tours de CD. D'où, on l'a vu, FE fait 609 tours pour un tour exact de AB, dont la circonférence est de 3,14 pieds puisque son diamètre est d'un pied. Le petit axe FE est muni à son extrémité d'une sorte d'anneau qui produit un son à grande vitesse de rotation. Ce son est égal, dans l'expérience, au 'ré' de l'épinette (*Clavecymbalus*) personnelle de Huygens, donc un ton au-dessus de la cloche de l'église qui fait un 'do'.

Or ces 609 tours correspondent à un tour de la roue AB effectué pendant une oscillation double du pendule de '1 pied moins 1/60 de pied', soit d'une longueur de 59/60 de pieds. Une oscillation double, c'est un aller retour, ce qu'on appelle de nos jours une vibration. La question est de déterminer le nombre de tours en 1 seconde. On détermine, ici par calcul mais c'est connu de Huygens, qu'un pendule qui fait une oscillation double en 1 seconde a une longueur de 9,4 pouces rhénans (environ 78 centimètres), donc, en convertissant en soixantième de pieds, 47/60 pieds rhénans.

Sachant que les temps sont en raison sous-doublées des longueurs, le nombre de tours en 1 seconde sera égal à 609 divisé par la racine carrée du rapport 59/47, c'est-à-dire 547 tours.

En utilisant un langage actuel, le 'ré' de son épinette est donc à 547 vibrations par seconde. Notons que le 'ré' actuel, avec un diapason à 440 Hz pour le 'la 3' est de 581 vibrations par seconde. Mais il faut savoir que le diapason fixe n'existait pas à cette époque, et que les musicologues pensent que le 'la 3' se situait entre 405 et 425 Hz. En prenant 415 Hz pour le 'la 3', ce qui est généralement admis par les adeptes de la musique baroque, nous avons 548 Hz pour le 'ré', la différence avec le 'ré' de Huygens est insignifiante.

Les notes manuscrites poursuivent :

180 sexpedæ (1080 pedes) — Rhenolandicæ puto — progressus soni in 1'.  
Aestate in Gallia<sup>4</sup>).

1080 } 2 pedes ferè.  
547 }

Tubus tamen pedalis, adeoque et bipedalis, Renol.<sup>5</sup>) sonat vix tam acutum quam  
Vt clavecymbali. hyeme in Hollandia.

Aliquid erroris forsan vel in celeritate soni metienda. Vel in circumferentijs rotarum et axiculi EF. In quo forsan etiam filum aliquantum præterfluit, non prorsus obsequente motu axiculi adeo ut plures alioqui futuri fuerant circuitus 547, unde et aliquanto minus pedibus 2 ex divisione<sup>6</sup>).

Huygens introduit alors la vitesse du son dans l'analyse de l'expérience. Il prend la valeur de 180 toises par seconde (180 *sexpedæ*, 1080 *pedes*, c'est en fait 183 toises rhénanes, soit 1098 pieds). Huygens met alors en rapport 1080 pieds et 547 vibrations, et note, à côté, '2 *pedes fere*', '2 pieds environ'.

Il s'agit ici de la première introduction de la notion de longueur d'onde d'une vibration sonore, même si Huygens n'utilise pas l'expression. En effet, ce qu'on appelle la longueur d'onde est égale au rapport de la vitesse (on dit plutôt célérité, puisqu'il n'y a pas de transport de matière) par la fréquence. Les 547 tours par seconde correspondent bien à une fréquence, et la vitesse de 1098 pieds nous donne une longueur d'environ 2 pieds. Cette expérience est la suite, si on veut, de celle de Chantilly, au cours de laquelle Huygens établit que la longueur des marches correspond à la hauteur du son répercuté par la chute d'eau du bassin.

A la fin du manuscrit, Huygens note :

Tubus tamen pedalis, adeoque et bipedalis, Renol. Sonat vix tam acutum quam ut  
clavecymbali, hyeme in Hollandia.

[Cependant, le tuyau d'un pied, et même celui de deux pieds (rhénans), sonne à peine aussi aigu que le 'do' de l'épinette, en hiver en Hollande.]

Il s'agit sans doute de tuyau d'orgue, dont l'accord est sensible à la température, et Huygens dit que si 547 vibrations par seconde correspondent à une longueur de tuyau d'un pied (on sait alors que les vibrations dans les tubes sont analogues à celles d'une corde, et fonction de leur longueur), elles correspondent ici à un

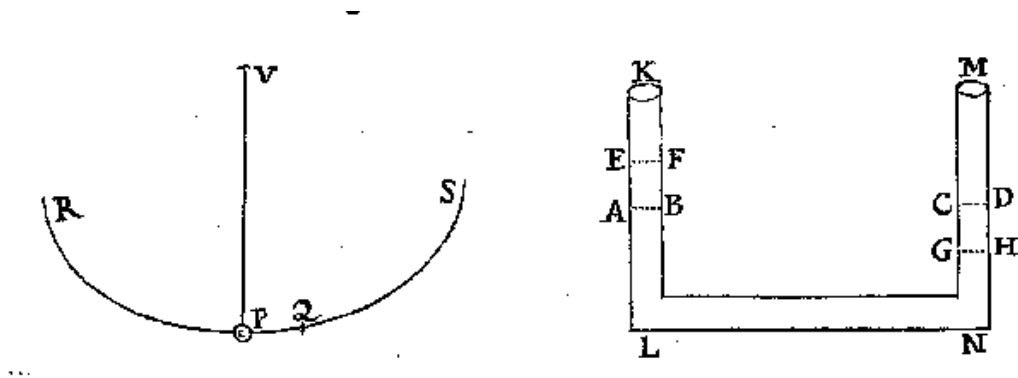
‘do’, et non à un ‘ré’, comme indiqué plus haut. Alors Huygens fait l’hypothèse que l’expérience ne soit entachée d’une erreur. Il suggère que les cordes d’entraînement aient pu patiner sur chaque roue, et que les mesures en soient faussées.

Nous assistons ici à une expérience telle que Huygens les pratique. Il utilise les outils qu’il connaît (le pendule, son épinette, la cloche de l’église, les tuyaux...), fait de nombreux calculs, destinés à corriger les particularités de ce qu’il a sous la main et à convertir les unités de mesure. Il interprète les résultats, invente une nouvelle grandeur, la longueur d’onde, et explique les erreurs d’expérimentation. On est un peu déçu par la brièveté des explications de cette expérience non aboutie. Huygens était sans doute fort occupé et a laissé de nombreux travaux inachevés.

## Newton et le tube en U

Un long chapitre (proposition 41 à 50) des *Principia* est consacré, c’est son titre, à la propagation du mouvement dans les fluides. Newton, comme à son habitude, semble ignorer les auteurs qui l’ont précédé, mais c’est bien sûr un effet de style, et il est difficile de croire qu’il ne les a pas lus. Il n’aborde pas la propagation du son par la représentation des ronds dans l’eau, mais, et c’est essentiel, il considère le son comme un processus particulier de mouvement dans un fluide. Cette façon très synthétique de concevoir la physique, toujours considérer le sujet comme un cas particulier d’un phénomène plus global, est nouvelle et semble annoncer la physique du début du XX<sup>ème</sup> siècle.

La proposition 44 a pour titre<sup>530</sup> : « Si de l’eau descend et monte alternativement dans les branches K,L,M,N, d’un canal, et qu’on ait un pendule dont la longueur entre le point de suspension et le centre d’oscillation soit égale à la moitié de la longueur de la colonne d’eau qui est dans le canal ; je dis que l’eau montera et descendra dans ce canal dans les mêmes temps dans lesquels ce pendule oscillera ».



L’analogie est complète entre le tube en U et la cycloïde, et les temps de descente sont égaux, quelles que soient les positions initiales. La seule donnée qui détermine la durée des oscillations, c’est la hauteur d’eau.

La proposition suivante concerne les vagues sur l’eau, et donc implicitement le processus des ronds dans l’eau<sup>531</sup> : « La vitesse des ondes est en raison sous-doublée de leur largeur. » La largeur des ondes est la distance entre deux points hauts, ce qu’on nomme de nos jours la ‘longueur d’onde’. La proposition de Newton dit donc que la vitesse de propagation est proportionnelle à la racine carrée des longueurs d’ondes. Et donc Newton peut généraliser : « Des pulsions étant propagées dans un fluide, chacune des particules de ce fluide, qui vont et viennent par un mouvement réciproque très prompt, sont toujours accélérées et retardées suivant les lois des oscillations des pendules. »

Dans le cas de la propagation de pulsions dans un fluide élastique, comme le son dans l’air, il faut tenir compte de l’élasticité et de la pression de l’air, ce que Newton exprime ainsi<sup>532</sup> :

La vitesse des pulsions qui se propagent dans un milieu élastique sont en raison composée de la raison sous-doublée de la force élastique directement, et de la raison sous-doublée de la densité inversement ; en supposant la force élastique proportionnelle à sa condensation.

C’est cet enchaînement de propositions qui mène Newton à calculer la vitesse du son en fonction de la pression atmosphérique rapportée à la hauteur de la colonne d’air qui fait pression sur l’air vibrant. Cette vitesse

<sup>530</sup> Newton, *Principia*, trad. Mme Du Châtelet, Paris, 1759, t 1, livre II, Prop. 44, p.400.

<sup>531</sup> *Idem*, prop. 45, p.401.

<sup>532</sup> *Id.*, prop. 48, p.406.

est constante, dans des conditions données, puisque ne dépendant que de paramètres constants, liés à la pression de l'air.

### De la Hire : une expérience approximative corrigée par Dortous de Mairan

La représentation du mouvement ondulatoire par les ronds dans l'eau pose bien des problèmes, on l'a vu, à la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle. On peut même dire que plus grand monde ne s'y réfère. Seul le vocabulaire demeure, il a reçu son label par Huygens dans le *Traité de la lumière*. Comme on se pose le problème, il faut faire une expérience, et De la Hire se propose d'examiner ce qui se passe réellement quand on jette un caillou dans l'eau.

On a un compte rendu de cette expérience, rédigé par l'abbé Gallois, dans un mémoire de l'Académie Royale des Sciences en date du 31 août 1693<sup>533</sup> :

Expérience touchant la régularité du mouvement des ondes qui se forment dans l'eau lorsqu'on y jette quelque chose, par M. de la Hire.

[...] Il mesura [M. de la Hire] donc, sur le bord d'un de ces bassins, une distance de douze pieds ; et, ayant jeté une petite pierre dans l'eau à quatre ou cinq pieds du bord vis à vis de l'endroit qu'il avait mesuré, il compta les demi-secondes à une pendule de poche.

Les ondes que le mouvement de cette pierre forma dans l'eau employèrent presque toujours huit seconde et demi ou environ à parcourir cet espace de douze pieds ; et elles s'étendaient également : car elles parcouraient à peu près six pieds pendant la moitié du temps qu'elle employaient à en faire douze.

M. de la Hire jeta ensuite dans un bassin plusieurs autres pierres, tantôt plus petites, tantôt plus grosses que celle qu'il avait jeté la première. Mais il ne trouva point de différence sensible entre les espaces de temps que les ondes formées par ces pierres de différentes grosseur employaient à parcourir les mêmes espaces de lieu. Ces observations ne se peuvent pas faire avec une très grande justesse par cette méthode ; il serait à souhaiter que l'on trouvât quelque autre méthode qui donnât ce temps plus exactement.

Si l'on compare cette vitesse que M. de la Hire a observée du mouvement des ondes de l'eau, avec la vitesse du mouvement des ondes de l'air, qui parcourent 180 toises en une seconde de temps, on trouvera que l'onde de l'air parcourt 763 pieds pendant que l'eau ne parcourt qu'un pied ; ce qui est à peu près la proportion que M. de la Hire a trouvée de la pesanteur de l'air à celle de l'eau.

On assiste ici à un exemple édifiant, mais sans conséquence, de mystification scientifique. A la fin, en particulier, lorsqu'on trouve que le rapport des vitesses correspond au rapport des poids respectifs de l'air et de l'eau, on frôle le sublime...

Par égard pour M. de la Hire mort en 1717, personne ne s'est avisé de le contredire, mais Dortous de Mairan, devenu membre de l'Académie après le décès de de la Hire, répond, en 1737, tardivement mais de façon cinglante à cet article.

Dans un long mémoire consacré au son, paru en 1737 dans les Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, Dortous de Mairan développe des théories parfois un peu obscures sur les correspondances entre les couleurs et les sons. Il aborde le fameux problème des ronds dans l'eau, et répond, à cette occasion donc, à cette analyse d'expérience dans ce '*Discours sur la propagation des sons*'<sup>534</sup>.

9. Remarquons d'abord combien la comparaison tant de fois rebattue de la propagation du son et du progrès des ondes, adoptée par des Auteurs d'ailleurs très éclairés, est peu concluante dans la question dont il s'agit, et souvent même capable d'induire en erreur.

Le son se fait dans l'intérieur et comme au centre du fluide qui en est le véhicule, les ondes au contraire se font à l'extrémité supérieure du fluide qui en est le sujet, à la surface qui le termine et qui le sépare, pour l'ordinaire, d'un autre fluide tout différent par sa nature, et surtout, par son poids. Le son est produit en vertu de l'élasticité de son milieu, et par les alternatives de compression et de dilatation de ses parties insensibles ; les ondes, au contraire, ne sont formées qu'en vertu de la pesanteur du liquide, par voie de chute et d'ascension consécutives, dans des portions ou des masses de ce liquide très sensibles, et plus ou moins grandes. Le son ne consiste qu'en des ressorts qui frémissent après avoir été frappés, les ondes ne sont que d'espèces de balanciers ou de pendules, qui tombent et qui se relèvent après avoir été tirés du lieu le plus bas de leur équilibre. Aussi la propagation du son, fort ou faible, se fait-elle toujours en temps égal, à

<sup>533</sup> Histoire et Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, t 10, pp.394-395.

<sup>534</sup> Dortous de Mairan, *Discours sur la propagation des sons*, in Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, 1737, p.5-7.

même distance ; le son parcoura toujours, par exemple, 173 toises en une seconde. Il peut y avoir de petites variations que diverses expériences y ont fait remarquer ; mais elles ne viennent que des imperfections inévitables de ces mêmes expériences, ou de quelque circonstance de temps ou de lieu, et jamais de la force ou de la faiblesse du son. Car le son qui est assez fort pour se faire entendre à dix lieues à la ronde ne parcoura pas avec plus de vitesse la première lieue que la seconde ou de la dixième. Et ainsi, le bruit du canon qui va plus loin et plus longtemps que le bruit du mousquet, parce qu'il se communique à une plus grande masse d'air, ne va pas plus vite. C'est que le bandement ou le débandement des ressorts en quoi consiste le son est toujours isochrone à lui-même, toujours de la même durée dans le même ressort, soit qu'il ait été faiblement ou fortement bandé. Mais il n'en est pas de même du mouvement progressif des ondes, leur vitesse ou leur lenteur sur la même eau est relative à la force qui les a excitées, à leur étendue, ou à leurs latitudes, et toujours en raison sous-doublées de ces latitudes, comme la durée des vibrations l'est à leur longueur.

Une expérience contraire à ces principes qui est rapportée dans nos anciens Mémoires, et attribuée à M. de la Hire, ne doit pas nous arrêter, quelque respectable d'ailleurs que ce nom soit pour nous : elle donne une vitesse constante aux ondes, soit grande soit petite, de même qu'au son, et en raison du poids spécifique de l'eau à celui de l'air. Mais ces principes sont démontrés dans M. Newton, et l'expérience même dont il s'agit, et de laquelle M. de la Hire a eu la prudence de se défier, leur sert de preuve sensible, quand elle est faite avec plus de soin, comme je l'ai éprouvé, et comme il sera plus particulièrement expliqué à l'Académie. Ainsi le progrès des grandes ondes sur le même liquide peut être double, décuple ou centuple par rapport à celui des petites, tandis que la propagation du son, fort ou faible, et quel que soit le corps résonnant, se trouve toujours être de la même vitesse dans le même air.

Il n'y a pas grand chose de plus dans cette analyse que dans celle de Perrault datée d'une cinquantaine d'années auparavant. Il est vrai qu'entre temps les théories de Newton se sont largement répandues dans les milieux scientifiques.

Après ce discours de la propagation de sons, Mairan détaille certains points dans des 'Eclaircissements'. C'est dans cette partie que Mairan répond à de la Hire.

Après avoir raillé la précision, moins de 0,3%, de la détermination du rapport entre les poids de l'air et de l'eau, et le résultat trouvé entre les rapports des vitesses, alors que de l'aveu même de de la Hire, les conditions de mesure sont peu adaptées, Mairan analyse les résultats de l'expérience de 1693<sup>535</sup> :

Mais, quelque imperfection que l'on y admette, je ne saurais encore trouver dans tout ceci de quoi concilier l'exactitude de l'observateur et la théorie de M. Newton, si clairement démontrée dans ses *Principes*. Car selon cette théorie, des ondes, par exemple de 3 pieds 8 lignes de latitude ou de même longueur à peu près que le pendule à seconde, parcourront cette longueur en 1 seconde, et par conséquent en 8 secondes et demi elles parcourraient près de 26 pieds. De sorte que, pour n'en parcourir que 12 dans le même temps, leur latitude doit être tout au plus de 8 pouces, savoir comme le quatrième terme des nombres 26 et 12, ou 13 et 6, qui expriment le rapport des espaces parcourus en temps égal élevés au carré, et de la latitude 3 pieds 8 lignes, ou 440 lignes, ce qui donne  $12^2 (169) 6^2 (36) :: 440 = 93$  et  $123/169 =$  environ 7 pouces 5/6 lignes. Ainsi les ondes sur lesquelles M. de la Hire fit son calcul auront été autour de 7 à 8 pouces de latitude.

Dortous de Mairan se trompe à son tour... En effet, cette latitude de 93,73 lignes correspond à 1 seconde (440 lignes). Il conviendrait de multiplier par 8,5, puisque c'est cette durée qui correspond à une longueur, mesurée par De la Hire, de 12 pieds (c'est d'ailleurs ce qu'il dit plus haut : « *De sorte que, pour n'en parcourir que 12 dans le même temps, leur latitude doit être...*, etc. »). On obtient donc 797 lignes, soit 5 pieds 6 pouces 5 lignes, ce qui est quand même différent de 7 à 8 pouces...

Ou bien, si on prend la règle de Newton : « *La vitesse des ondes est en raison sous doublée de leur largeur* » (livre II, prop. 45), le rapport des vitesses est proportionnel au rapport des racines des longueurs d'ondes. La vitesse pour une longueur de 3 pieds 8 lignes est de 440 lignes par seconde, donc la vitesse pour 12 pieds en 8,5 secondes est de 203 lignes par seconde. Or,  $440/203$  est égal au rapport des racines des longueurs (26 pieds, soit 3744 lignes, et la longueur cherchée), d'où on tire que la racine carrée de la longueur cherchée est égale à  $203 \times \sqrt{3744} / 440$ , d'où  $203 \times 61,19/440 = 28,23$ , qu'on élève au carré, c'est-à-dire que la longueur d'onde cherchée est de 797 lignes. C'est bien le même résultat, 5 pieds 6 pouces 5 lignes.

Quoi qu'il en soit, Dortous de Mairan met un terme définitif à cette analogie des ronds dans l'eau avec la propagation du son dans l'air, puisque, et les raisons ne manquent pas, les deux processus n'ont pas grand chose de commun, si ce n'est, peut-être la notion de mouvement sans transport de matière. Il s'agit là, tout au

<sup>535</sup> *Idem*, p.45-48

plus d'une métaphore, d'une image à usage didactique, mais il convient, encore de nos jours, d'être vigilant et attentif lorsqu'on en fait usage.

## **Ondes, ondulations, oscillations et vibrations dans l'Encyclopédie**

Chacun de ces mots donne l'occasion aux rédacteurs de définir, d'expliquer, et finalement de s'en remettre à Newton. C'est ainsi que d'Alembert intervient sur chacun de ces termes, renvoyant le lecteur aux autres articles. Et comme une grande partie du fonds de l'Encyclopédie des Lumières est constitué par la *Cyclopædia* de Chambers, on a droit à quelques polémiques feutrées dans lesquelles Chambers renvoie Huygens et ses ondulations de lumière à des études plus approfondies, à cause, dit-il de l'incompatibilité entre les ondes circulaires et les rayons rectilignes.

Le vocabulaire des encyclopédistes est encore imprécis, comme l'atteste l'article 'ondulations' rédigé par d'Alembert :

Ondulation, se dit aussi d'un certain mouvement par lequel les parties de l'air sont agitées de la même manière que les vagues de la mer. C'est ce qu'on croit qui arrive, quand on frappe une corde d'un instrument de Musique. *Voyez* Corde.

On croit aussi que le mouvement ondulatoire de l'air est la cause du son. *Voyez* Son.

Quelques auteurs aiment mieux appeler ce mouvement du nom de *vibration*, que de celui d'*ondulation*. *Voyez* Vibration.

Au mot 'vibration', on trouve, du même d'Alembert :

Les auteurs mécaniciens se servent du mot *oscillation* au lieu de *vibration*. *Voyez* Oscillation.

Cependant d'Alembert décrit assez bien le processus des ronds dans l'eau :

On peut concevoir la formation des *ondes* de la manière suivante :

La surface de l'eau tranquille étant naturellement plane et parallèle à l'horizon ; si, de quelque manière que ce soit, elle vient à se creuser vers le milieu, comme en *A*, sa cavité sera aussitôt environnée d'une élévation *B B*. Et le fluide qui compose cette élévation descendant par sa gravité, & allant au-dessous du niveau en vertu de sa vitesse acquise, il se formera une nouvelle cavité ; mais cette nouvelle cavité ne se peut faire qu'en élevant l'eau des deux côtés, ce qui remplira la première cavité, et formera une nouvelle élévation vers *C* ; et, par la dépression de cette dernière élévation, l'eau en formera une nouvelle du même côté. Il y aura ainsi un mouvement successif dans la surface de l'eau, et la cavité qui pousse en avant l'élévation, sera mue de *A* vers *C*. Cette cavité jointe à l'élévation voisine forme ce qu'on appelle une *onde*, et l'espace occupé par l'*onde* sur la surface de l'eau, mesuré suivant la direction de l'*onde*, est appelé la *largeur* de l'*onde*.

Néanmoins, à la suite de cette définition tout à fait correcte, d'Alembert fait, en plus de cent lignes, une description détaillée du phénomène des 'ronds dans l'eau', illustrations à l'appui. La propagation des sons fait l'objet de quelques remarques pertinentes mais prudentes.

Chambers expose la théorie de Newton sur la vitesse des ondes en fonction de leur largeur :

Dans les mouvements des pendules, et par conséquent dans ceux des ondes, les espaces parcourus sont en raison du temps et de la vitesse ; d'où il s'ensuit que les vitesses des ondes sont comme les racines carrées de leurs largeurs : car comme les temps dans lesquels elles parcourent leurs largeurs, sont dans la raison de ces racines carrées, il faut aussi que les vitesses soient dans la même raison, afin que le produit des temps par les vitesses, soit comme la largeur des ondes, ou les espaces parcourus.

On voit que vers 1750, la théorie des ondes n'était pas encore réellement établie, et la controverse sur les cordes vibrantes, qui va animer la communauté scientifique de 1749 à 1760, en particulier dans les Mémoires de l'Académie de Berlin, viendra apporter une nouvelle représentation des phénomènes ondulatoires, une représentation mathématique cette fois, grâce aux équations différentielles aux dérivées partielles devenues indispensables pour la compréhension des phénomènes naturels évoluant dans le temps.

## **Conclusion : une métaphore bien pauvre mais qui se révèle enrichissante**

La métaphore des ronds dans l'eau, dans un premier temps, est utilisée pour modéliser un type de mouvement mal maîtrisé, le mouvement sans transport de matière. Mais ses promoteurs ne s'engagent pas dans la réflexion nécessaire pour en produire des connaissances accrues sur la physique des sons. Elle a un rôle



fédérateur entre les différents courants de la physique, et cette image est utilisée telle quelle jusqu'à la fin de la Renaissance. Au XVII<sup>ème</sup>, en revanche, on l'utilise de plusieurs façons, soit en la détournant de son objectif principal pour étudier d'autres phénomènes de la propagation des sons, comme chez Bacon ou chez Grimaldi. On la réfute également pour son manque de pertinence et finalement de pédagogie, on la transforme, avec Galilée pour en faire une réelle expérience, ou on l'analyse avec les outils de la physique, comme Newton ou de Mairan, pour mieux encore définir le mouvement et la propagation du son. Finalement, le seul à utiliser de façon authentique cette analogie, chez les savants modernes, est celui qui en avait le moins besoin, c'est l'atomiste Gassendi dont la théorie pouvait fort bien se passer de cette parabole stoïcienne.

## Intermède - Les textes sur le porte-voix

Si nous écartons les applications musicales, au cours de la période considérée ici, nous n'avons rencontré que peu d'appareils, d'instruments ou de machines exploitant les propriétés physiques du son et constituant des applications possibles de ces propriétés. Parmi elles, il en est une qui a été développée dans un but utilitaire, c'est le porte-voix. Le présent chapitre constitue une recherche bibliographique sur l'invention et l'histoire de cet instrument, au fonctionnement beaucoup plus complexe que laisse apparaître sa forme simple. Cette saga de l'amplification se poursuit pendant plus de trois siècles, et cette étude n'en constitue qu'une ébauche.

### Introduction

#### Présentation du porte-voix

En 1671, un mécanicien anglais du nom de Morland, publie dans les *Philosophical Transactions* un mémoire présentant un Tuba stentoro-phonica, an instrument of excellent use, as well at sea, as at land ; invented and variously experimented in the year 1670. Il s'agit ici du premier porte-voix moderne, qui n'est semble-t-il pas réellement une invention, puisque, dès l'antiquité, de tels instruments auraient existé. Un porte voix est un instrument destiné à parler à grande distance, sa forme, variable, est en général un cône allongé muni d'un pavillon ressemblant à celui d'une trompette, et d'une embouchure pour y parler. Sa longueur est comprise entre 50 cm et 3 m. Le cône peut être replié, comme pour les instruments à vent. Les matériaux utilisés sont variables, mais souvent métalliques. Le principe repose sur la limitation de l'atténuation d'intensité due à la propagation sphérique du son, ainsi que sur l'adaptation d'impédance acoustique entre l'air modulé contenu dans le cône et l'air inerte extérieur. La longueur, la courbure du cône et la forme du pavillon sont des paramètres importants de son efficacité. Les lois physiques de l'amplification dans les porte-voix ont été mises en évidence par Webster en 1919. Les procédés de diffusion électro-acoustiques utilisent les mêmes lois physiques pour sonoriser de grands espaces que celles qui permettent au porte-voix de porter la voix au loin. On lui donne le nom de tuba stentoro-phonica, speaking trumpet, tromba parlante, trompette parlante, trompette à parler de loin, et d'autres encore...

Au XVII<sup>ème</sup> siècle, les savants sont fréquemment sollicités pour apporter des solutions aux différents problèmes qui se posent aux armées en activité et notamment à la Marine. C'est ainsi que Galilée propose une théorie de la balistique et du calcul de la longitude, et que de nombreux savants se penchent sur le problème de la référence temporelle en mer, en réalisant des horloges de plus en plus précises (Harrison, Huygens). C'est aussi à cette époque que les problèmes de communication se révèlent, plus particulièrement en mer. L'invention de Morland rencontre donc rapidement un grand succès auprès des amirautes.

Dans ce mémoire Morland décrit plusieurs porte-voix réalisés par lui, de matériaux, de formes et de dimensions diverses. Puis il tente une explication du phénomène fondée sur la réflexion des sons. Morland termine son article par une invitation à la communauté scientifique à proposer la forme idéale pour transmettre la voix à distance. On sait que les savants du XVII<sup>ème</sup> étaient coutumiers de cette pratique du 'concours', notamment en mathématiques. Dès la fin du siècle et durant tout le XVIII<sup>ème</sup> siècle, plusieurs auteurs se sont donc intéressés à la question, et cette recherche accompagne l'évolution des théories sur la propagation des sons avec les questions, les doutes et les controverses qui ponctuent fréquemment ce genre de quête. L'instrument, surtout utilisé par les marins, reviendra avec force sur la scène technique vers 1880 avec le phonographe et son inévitable pavillon.

Pour Morland et nombre de ses successeurs, le phénomène d'amplification dans les porte-voix s'explique par les réflexions du sons sur les parois de l'appareil. La réflexion du son est observée depuis très longtemps dans les échos, Aristote en parle lorsqu'il traite de la nature du son<sup>536</sup>. Avec l'apparition des théories ondulatoires et de la physique des milieux élastiques, la propagation du son perd son apparente simplicité et les observations se feront plus rigoureuses. Au XIX<sup>ème</sup> siècle, aux côtés de nombreux physiciens qui évoquent l'amplification des sons dans les pavillons selon les lois de la réflexion, d'autres, plus honnêtes, avouent leur désarroi devant un phénomène encore inexpliqué. La théorie des pavillons, très complexe, sera élaborée au début du XX<sup>ème</sup> siècle et connaîtra de nombreux développements dans la conception des équipements de diffusion sonore.

<sup>536</sup> Aristote, *Traité de l'âme*, livre II, chapitre 8.

## Présentation des textes sur le porte-voix

Dans son article, Morland se présente comme l'inventeur du *tuba stentoro-phonica*, et lance un appel à la communauté scientifique pour en trouver la forme idéale.

La publication de ce texte va d'abord produire des querelles d'antériorité. Kircher, jésuite savant traditionnel et un peu mystique, revendique la paternité du porte-voix décrit dans sa *Musurgia universalis* en 1650. Il publie en 1673 un ouvrage, *Phonurgia*, consacré à la 'phonocamptique', étude des réflexions du son analogues à celles de la lumière. Dans la préface, il fustige Morland et cite deux éminents collègues à l'appui de sa réclamation, ainsi que Gaspar Schott.

Peu après la publication de l'article de Morland, le Français J.-B. Denis publie à Amsterdam, dans le *Recueil des mémoires et conférences concernant les arts et les sciences*, qui fait suite au *Journal des sçavans* momentanément suspendu, une série d'articles sur la 'trompette à parler de loin', accompagnés d'une traduction du mémoire de Morland. A l'occasion de cette publication, Denis fait également état de fabrications d'instruments antérieures à la publication de Morland.

Cassegrain, professeur à Chartres est sans doute le premier à répondre au défi de Morland dans un article publié dans le *Recueil des mémoires* en 1672. Deux ans plus tard, un certain Hautefeuille, prétendant malheureux à l'Académie Royale des Sciences, publie une *Explication de l'effet des trompettes parlantes*. En 1678, un certain Conyers publie un article dans les *Philosophical Transactions* proposant une 'reflecting trumpet'. En 1678, l'italien Montanari (1633-1687) écrit un *Discorso sopra la tromba parlante*<sup>537</sup>. Puis en 1685, à Nuremberg, Johann Christoph Sturm écrit un texte sur le sujet, *De tubis stentoreo-phonis sive acusticis*, dans un ouvrage consacré à quelques expériences de physique<sup>538</sup>. On le voit, l'instrument et l'explication de l'amplification du son passionne la communauté scientifique européenne. A la Royal Society on débat du problème depuis le début, et Oldenburg engage Huygens à s'exprimer sur le sujet. Même Newton en glisse un mot dans ses *Principia*.

Plus tard, sur le continent, l'allemand Kazauer écrit une *Dissertatio inauguralis de tuba stentorea* en 1715, et vers 1719, un cartographe de Leipzig nommé Hase publie une *Dissertatio de tubis stentoriis*. On peut également citer Gravesande qui participe au débat sur la meilleure forme à donner à l'instrument<sup>539</sup>. Curieusement les savants français de l'Académie des Sciences ne participent que peu à ce débat sur la propagation du son en ce début du XVIII<sup>e</sup> siècle.

Alors que le sujet semble abandonné, il rebondit en 1761 avec le célèbre mathématicien Jean-Henri Lambert qui publie dans les Mémoires de l'Académie des Sciences de Berlin un article, un de ses premiers, intitulé *Sur quelques instruments acoustiques*. Il y reprend les différentes théories et développe la sienne, propre à transmettre les sons à distance de la façon la plus efficace. Le traité de Lambert sera traduit en allemand en 1796 par Gottfried Huth, jeune professeur de mathématiques et d'astronomie, qui proposera un usage particulier au porte-voix, la transmission de messages à distance au moyen de relais disposés sur un parcours déterminé, une variante 'tout temps' du télégraphe de Chappe testé deux ans auparavant entre Paris et Lille. Huth propose pour cette invention le nom inédit de 'téléphone'<sup>540</sup>.

Chladni est sans doute le premier théoricien de l'acoustique physique, et son *Traité d'acoustique*, écrit entre 1787 et 1793, paru en 1802 en allemand<sup>541</sup>, puis en 1809 en français<sup>542</sup>, reste une référence pendant longtemps parmi les acousticiens. Il traite bien entendu la théorie du porte-voix et de l'écho et apporte son doute sur les théories antérieures.

C'est alors que dans les Annales de Chimie de 1805, l'ingénieur des mines J.H. Hassenfratz publie un article intitulé *Observations sur la cause qui augmente l'intensité du son dans les porte-voix*. Ce texte marque une rupture dans la théorie, par la relation qui est faite d'expériences cruciales qui contredisent l'explication par la réflexion du son sur les parois de l'appareil. Toutefois Hassenfratz ne fournit aucune explication du phénomène.

<sup>537</sup> Geminiano Montanari, *Discorso sopra la tromba parlante*, Guastalla, 1678, Venetia, 1715.

<sup>538</sup> Johann Christoph Sturm, *Collegium Experimentale sive Curiosum*, Nuremberg, 1685, t 2, tentamen VII, p. 142-164.

<sup>539</sup> s'Gravesande, *Physices Elementa mathematica*, Lyon, 1721, trad. franç., Joncourt, Leyde, 1746, t. 2, livre IV, chap. 7, p. 69.

<sup>540</sup> Gottfried Huth, J.-H. Lamberts Abhandlung uber einige akustische Instrumente. Aus dem Franzosischen ubersetzt nebst Zusätzen uber das so genannte Horn Alexanders des Grossen, uber Erfahrungen mit einem elliptischen Sprachrohre und uber die Anwendung der Sprachrohre zur Telegraphie. Berlin, 1796.

<sup>541</sup> Chladni E.F.F., *Die Akustik*, Leipzig, Breitkopf et Härtel, 1802, 310p.

<sup>542</sup> Chladni E.F.F., *Traité d'acoustique*, Paris, Courcier, 1809, 375p.

Au cours du XIX<sup>ème</sup> siècle, même si le porte-voix reste utilisé, en particulier dans la marine, sa théorie n'est plus un objet d'études, le défi de Morland est oublié et le sujet représente une partie infime de la connaissance en acoustique, elle même relativement délaissée par les physiciens. On cite encore le porte-voix dans les ouvrages scolaires et universitaires, tantôt en suivant les théories de la réflexion, tantôt en avouant son ignorance des causes de l'amplification, mais peu à peu le sujet semble être relégué au rang des phénomènes anecdotiques.

Toutefois en 1855 un professeur de physique, P.-A. Daguin, reprend les expériences d'Hassenfratz et décrit en esquisant une explication le phénomène d'amplification<sup>543</sup>.

A côté de ces traités, on peut citer un article signé d'Alembert dans l'Encyclopédie, et quelques ouvrages de physique qui abordent l'étude des porte-voix, l'*Essai de physique* de Musschenbroek (1751), l'*Abrégé de physique* de Saintignon (1763), le *Cabinet de curiosité* de Sigaud de La Fond (1784), le *Dictionnaire raisonné de physique* de Brisson (1781), et au XIX<sup>ème</sup> siècle, les cours de physique de Jacotot (1801), de Biot (1816), de Despretz (1836), de Lamé (1840), de Daguin (1855), de Jamin (1859), et enfin les ouvrages d'histoire de la physique, dont celui de Hoefer (1872) et de Poggendorff (1883).

Avec l'invention du phonographe par Edison en 1877 s'ouvre une ère nouvelle pour les pavillons acoustiques. Jusqu'à l'avènement de l'électricité pour amplifier les sons, vers 1914, le pavillon reste le meilleur moyen de communiquer à l'air ambiant les petites vibrations émises par le diaphragme de l'appareil. L'américain Webster développera en 1919 une théorie complète de l'amplification dans les pavillons, faisant appel à la notion nouvelle d'impédance acoustique<sup>544</sup>.

Alors s'ouvre un ère nouvelle, durant tout le XX<sup>ème</sup> siècle, avec la conception d'équipements électroacoustiques de plus en plus puissants qui font souvent appel à la théorie des pavillons.

## **Les théories de l'amplification des sons dans les porte-voix**

A partir de la toute fin du XVII<sup>ème</sup> siècle, on connaît grossièrement le fonctionnement de la propagation des sons. On sait alors, on devrait savoir, que les analogies entre le son et la lumière comportent leurs limites. Même si elle sont encore inconnues, on sait que les lois de propagation du son sont soumises à la nécessité d'un milieu élastique dont les déformations successives constituent la nature même des ondes sonores. Le Principe de Huygens nous donne les particularités de cette propagation au contact avec un obstacle, et la théorie de Newton définit le son comme une succession de compressions et de dilatations de l'air. L'étude des sons n'est plus seulement expérimentale, elle possède bientôt les outils théoriques qui permettent de prévoir ses comportements. On peut alors s'interroger sur la persistance, pendant près d'un siècle, de théories embrouillées et incomplètes des tenants de l'analogie entre son et lumière, qui se fondent exclusivement sur une propriété commune, la réflexion.

### **Kircher et la *Phonocamptique***

Dans *Musurgia universalis*, Kircher nous présente le porte-voix d'Alexandre (qu'il avait déjà mentionné dans son *Ars magna lucis et umbrae*), dont il aurait trouvé la description dans un manuscrit de la bibliothèque vaticane, *Secreta Atistotelis ad Alexandrum Magnum*, d'un auteur inconnu du nom ambigu d'Aristote. J.C. Poggendorf, dans son *Histoire de la physique*<sup>545</sup>, dit que ce manuscrit a bien existé, et s'appuie sur un auteur de la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle, Morhof (1639-1691), qui en a donné un extrait dans lequel il décrit l'instrument<sup>546</sup>. D'après Poggendorff, ce manuscrit est une traduction de l'arabe au latin qui a été imprimé en 1516 à Bologne. Mais il met en doute l'authenticité du nom de l'auteur, Aristote, qu'il attribue, plutôt qu'au philosophe de Stagire, à un écrivain postérieur ou à une note du traducteur. De nos jours on connaît très bien cet

<sup>543</sup> P.-A. Daguin, *Sur la théorie du port-voix et du cornet acoustique*, dans les Mémoires de l'Académie des Sciences de Toulouse en 1864.

<sup>544</sup> publiée dans un célèbre article des Proceedings of the National Academy of the Sciences of the USA, intitulé *Acoustical impedance and the theory of horns and of the phonograph*.

<sup>545</sup> J.C. Poggendorf : *Geschichte der Physik*, Berlin, 1879, trad. E. Bibart et G. de la Quesnerie, *Histoire de la physique*, Dunod, Paris, 1883, p 253.

<sup>546</sup> Daniel Georg Morhof, de Scypho vitreo per certum humanae vocis sonum fracto, Reumann, Kiel, 1672, 1682.

opuscule qui a subi de nombreuses variantes et traductions au cours des siècles. Il est établi qu'Aristote n'en est pas l'auteur et que ce texte, sans doute d'origine arabe, date au plus tôt du IX<sup>ème</sup> siècle.

Le porte-voix d'Alexandre se présente comme une trompette dont le tuyau se sépare, juste après l'embouchure, en deux parties semi circulaires qui se rejoignent avant de déboucher sur le pavillon. L'ensemble fait apparemment 2,5 mètres de longueur pour un diamètre d'environ 1,5 mètre. Ce dessin, que Kircher a fait exécuter selon ce qu'il avait compris du manuscrit du Vatican, sera reproduit à maintes reprises par différents auteurs, à chaque fois que le porte voix sera un objet d'étude, jusqu'à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle.

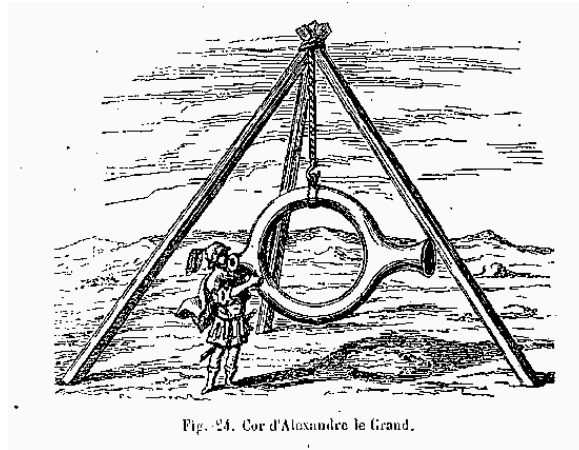


Fig. 24. Cor d'Alexandre le Grand.

On remarque, sur ce dessin que Kircher a fait exécuter, la mise en scène caractéristique du savant jésuite, destinée sans doute à masquer la légèreté de ses propositions. On ne sait pas si la corne d'Alexandre était réellement prévue pour amplifier la voix, ou si elle fonctionnait comme un cor produisant un son grave et puissant qui se propageait sans doute très loin. Cet instrument a été reproduit au XVIII<sup>ème</sup> siècle par Huth qui cite son expérience dans un appendice à sa traduction du traité de Lambert<sup>547</sup>. D'après Huth, le résultat est probant même si l'effet semble être produit par l'adjonction d'un pavillon plus important que sur le dessin de Kircher.

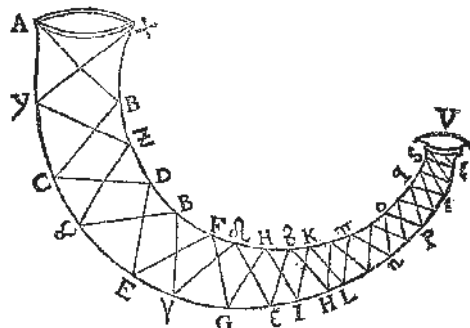
La démarche de Kircher est essentiellement géométrique et pour lui le son se propage sous forme de rayons qui se réfléchissent comme les rayons de lumière. Il en déduit un certain nombre de procédés basés sur cette propriété.

Kircher prétend que le son se propage mieux et plus fort dans un tube de forme circulaire, comme dans le tube d'Alexandre, que dans un tube rectiligne :

### Experimentum I I I.

*Vox per tubos circulares melius propagatur vehementiusque intenditur, quam per rectos.*

**E**xperientia quotidiana docet, sonum vehementius in tubo contorto, quam recto intendi, monstrant id imprimis tubæ, monstrat cornu Alexandri Magni, quo integrum exercitum cogere solebat, in circulum contortum, ut in historia sonorum prodigiosorum in dictum est. Queritur autem huius rei causa. Notandum igitur, quod sicut multiplicatio luminis, & caloris fit multiplici lucis reflexione, ut in Arte Magna Lucis & Umbra docuimus, ita vehementia soni fit multiplici soni in concavo circulari reflexione; Nam tubo recto soni tantummodo coarctati & in unum collecti propagatio est, in circulari vero non tantum colligitur, sed & ex infinita quadam linearum sonorum reflexione plurimum augetur & intenditur.



<sup>547</sup> Gottfried Huth, J.H. Lamberts Abhandlung über einige akustische Instrumente. Aus dem Französischen übersetzt nebst Zusätzen über das so genannte Horn Alexanders des Grossen, über Erfahrungen mit einem elliptischen Sprachrohre und über die Anwendung der Sprachröhre zur Telegraphie, Berlin, 1796, p. 78 et suiv.

L'expérience quotidienne enseigne que le son est dirigé plus fortement dans un tube courbé que dans un droit, les trompes le montrent particulièrement ; la corne d'Alexandre le Grand, au moyen de laquelle il avait coutume de rassembler l'armée entière, montre une enveloppe circulaire, selon ce qui est dit dans l'histoire des sons prodigieux. Or on demande quelle est la cause de ceci. Il est à noter dans ce cas que, de même que l'accroissement de l'éclairement et de la chaleur proviennent de la réflexion multipliée de la lumière, comme nous l'avons expliqué dans l'*Ars Magna Lucis et Umbrae*, de même la force des sons vient de la réflexion multipliée du son dans une cavité circulaire. En effet, alors que dans un tube droit, la propagation du son est seulement concentrée et regroupée en un seul flux, elle n'est pas autant ramassée dans un tube circulaire, mais elle est considérablement amplifiée et dirigée par cette réflexion infinie des trajectoires sonores.<sup>548</sup>

Kircher s'appuie sur l'expérience des anciens et en profite pour faire une allusion à un précédent ouvrage dans lequel il a déjà publié le dessin de la trompe d'Alexandre. De façon tout à fait aristotélicienne, Kircher affirme avec autorité, invoque l'expérience quotidienne, et explique le phénomène par analogie avec les lois de la catoptrique, analogie qui est assénée avec force. L'hypothèse est affirmée, l'explication doit forcément s'y conformer. Curieusement, sur son dessin, on distingue mal ce qui détermine les premiers angles de réflexion à l'embouchure, et ce qui justifie ce trajet des 'rayons sonores'. Par ailleurs il ne fournit pas d'explication sur la supériorité de la forme circulaire, si ce n'est sa perfection supposée. Cependant il observe deux propriétés importantes et liées, la directivité et l'amplification des sons, sans toutefois vérifier leur validité. Il est vrai que la forme conique et évasée de la trompe induit presque naturellement la directivité du flux sonore que l'on pressent comme se moulant dans la forme de l'instrument. Cette erreur qui peut être attribuée au 'bon sens' perdurera pendant encore longtemps. On sait maintenant que cette directivité se manifeste au-delà d'une certaine fréquence qui dépend de la dimension de l'ouverture du pavillon. De même il est vrai que les sons sont amplifiés, ou plus exactement qu'ils sont moins atténués, mais les raisons de ce phénomène sont bien plus complexes que les multiples réflexions invoquées dans ce texte, ce que Bacon et Mersenne avaient déjà soulevé. Grâce à la force de persuasion portée par les nombreux dessins illustrant les ouvrages de Kircher, le paradigme de la réflexion des 'rayons sonores' analogue à celle des rayons lumineux, imprégnera longtemps les théories de la propagation du son, en évitant, même après Newton, la complexité du phénomène induite par la propagation sphérique des ondes sonores.

## Samuel Morland

Le Chevalier Samuel Morland (1625-1695) était un ancien diplomate qui s'était reconverti dans l'étude des sciences. Mécanicien auprès de Charles II, il est l'inventeur de plusieurs machines, dont une pompe à eau et une machine arithmétique (1673, Leibniz en parle dans sa correspondance avec J.S. Haes en 1693).

Le mémoire de Morland<sup>549</sup> sur le *Tuba stentorophonica* est composé de trois chapitres. Le premier décrit les différents modèles de 'trompettes à parler de loin' qu'il a fait fabriquer, ainsi que le récit des expériences et leurs résultats. Le second est une tentative d'explication théorique du phénomène d'amplification, et le troisième propose quelques applications pratiques de l'invention dont l'utilisation dans la marine pour communiquer à distance.

Deux figures complètent l'ensemble, la première illustre le premier chapitre, et la seconde est un schéma de la propagation des sons dans et hors du *tuba*.

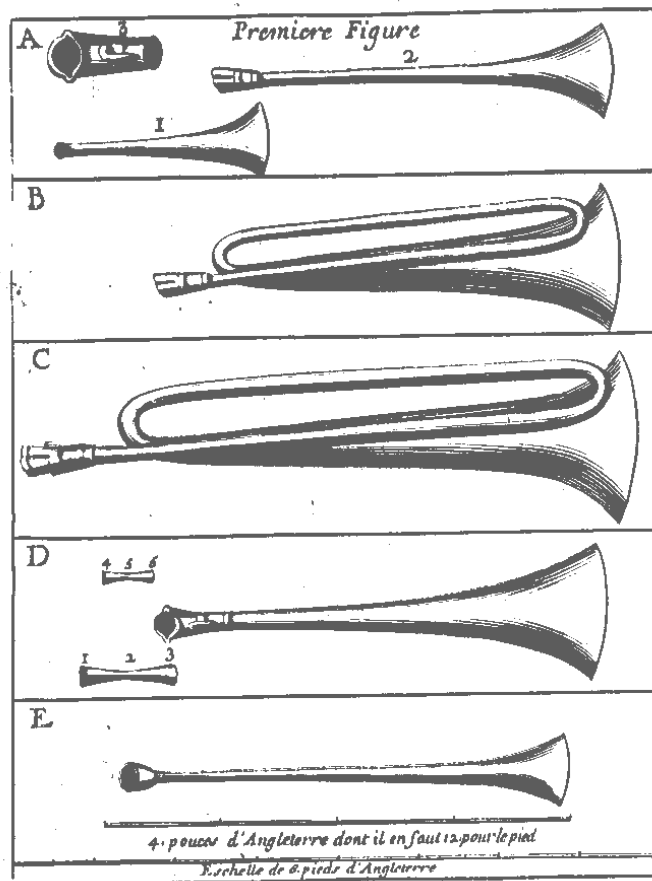
La première réalisation est une trompette en verre (fig. A1), d'une longueur de deux pieds huit pouces (env. 80 cm), d'ouverture 11 pouces (28 cm), et d'embouchure deux pouces et demi (env. 6 cm). Morland fait quelques essais devant diverses personnes, et encouragé par les résultats, passe une seconde commande d'une trompette en airain (bronze). Ce second modèle (fig. A2) est long de quatre pieds et demi (1,37 m) pour des diamètres d'ouvertures de 12 et 2 pouces (30 et 5 cm). Pour éviter les fuites d'air à l'embouchure, Morland imagine un système de soupape muni d'une languette de cuir (fig A3). Ce second modèle est présenté avec succès au roi et à quelques seigneurs de la cour, la portée de l'instrument est alors d'un demi mille (env. 800m). Morland en fait alors fabriquer, de forme courbe à la façon d'une trompette (fig. B) afin d'en rallonger le tube (longueur de 16 pieds 8 pouces (env. 5 m), diamètres de 19 et 2 pouces (48 et 5 cm)). La portée passe à un mille et demi (env. 2400m). Un plus grand modèle (fig. C, 21 pieds pour 2 pieds de diamètre) n'est sensiblement pas plus efficace. Alors Morland travaille la forme, et propose deux modèles plus petits, mais dont l'accroissement des diamètres est différents. Il observe que le modèle présenté en figure D est plus performant, trois quarts de

<sup>548</sup> Kircher, *Musurgia universalis*, Rome, 1650, tome 2, p 274 (traduction par mes soins)

<sup>549</sup> Samuel Morland, 'Tuba stentoro-phonica, an instrument of excellent use, as well at sea as at land...' in *Philosophical Transactions*, London, 1671, vol 6, p 3056.

mille de portée (1200 m) pour une longueur de 5 pieds 6 pouces (1,70 m) et de diamètres 21 pouces (53 cm) et 2 pouces (5 cm) pour l'embouchure. Le modèle présenté en E n'est semble-t-il pas très efficace.

Le 14 octobre 1671, après avoir procédé à de nombreux essais, le gouverneur du château de Deal fait parvenir à Arlington, premier secrétaire d'Etat, un rapport élogieux sur l'utilité de cette trompette, surtout en mer.



Dans la seconde partie de son mémoire, Morland tente d'expliquer le phénomène d'amplification. Il fait une description de la propagation des sons telle qu'on l'envisage en 1670, et d'abord par l'analogie avec les ondes dans l'eau :

Quant à la nature des sons et de la voix, j'avouë bien que ces cercles qui se font dans l'eau, quand elle s'écarte à la rencontre de quelques corps qui frappent sa surface, et qu'ensuite elle revient étant repoussée par les côtes du vaisseau où elle est contenue, semblent nous assurer assez, que les sons en frappant l'air luy communiquent aussi un mouvement circulaire qui s'étend toujours et se dilate à la ronde, jusqu'à ce qu'il rencontre quelque obstacle qui le réfléchisse en forme d'écho.<sup>550</sup>

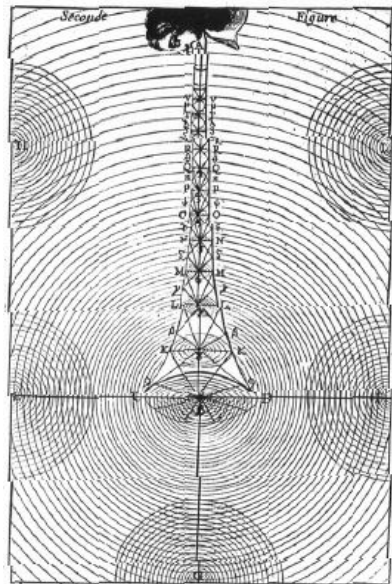
Morland qui est plus un mécanicien qu'un savant, procède de façon empirique et fait certaines observations. Tout d'abord, un simple tube n'amplifie pas les sons à distance, ensuite l'orifice doit être aussi grand, sinon plus, que la bouche du locuteur et doit s'y adapter parfaitement, sans fuite, et enfin l'accroissement du diamètre de l'instrument doit être progressif et non 'soudain' (*The instrument must be enlarged by degrees, and not too suddenly*), jusqu'au pavillon.

Pour Morland, le son se propage en cercles concentriques et lorsqu'il se réfléchit, il émet à nouveau des cercles concentriques à partir du point de réflexion. On le voit sur la figure 2, les cercles émanant des parois réfléchissent les cercles précédemment reçus. Dans le pavillon, Morland suggère que les réflexions soient identiques et convergent vers un ensemble de points alignés sur l'axe de l'instrument. Cette convergence accroît l'intensité sonore à mesure qu'on avance vers l'extrémité large du pavillon, pour atteindre un maximum

<sup>550</sup> Samuel Morland, Discours sur la trompette à parler de loin, traduction in Recueil des mémoires et conférences sur les arts et les sciences, présentées à Monseigneur le Dauphin pendant l'année 1672, par Jean-Baptiste Denis, p. 13-31.

d'intensité au point B, centre du cercle formant l'ouverture. De ce point, le son se propage à nouveau sous forme de cercles, à l'extérieur et amplifié par le dispositif. Morland affirme avoir expérimenté que le maximum d'intensité se trouve lorsqu'on place son oreille à ce point.

Pour vérifier son hypothèse, Morland confectionne une forme semblable au tuba qu'il plonge dans un bain de vif-argent. Il frappe alors avec un bâton le point de cette forme qui correspond à l'embouchure, et constate que des cercles se forment à la surface du vif-argent.



L'hypothèse de Morland est une espèce de compilation des théories en présence à cette époque. D'une part s'inspirant de l'analogie des ronds dans l'eau, il y revient d'ailleurs avec son expérience dans le vif argent qui ne démontre rien, puisque les cercles se formeront quel que soit l'endroit où on frappe. D'autre part en invoquant les réflexions sur les parois, selon le modèle optique et avec une inévitable comparaison avec le miroir parabolique qui concentre les rayons solaires au foyer. Cependant à l'inverse de Kircher qui ne s'intéresse qu'à la trajectoire rectiligne des rayons sonores, Morland insiste bien sur la propagation circulaire des perturbations de l'air, ce qui rejoint les dernières théories alors en cours d'élaboration notamment chez Fabri.

Morland termine son mémoire par un appel à la communauté scientifique afin de déterminer la forme idéale du porte voix. C'est ainsi que de nombreux savants vont, pendant plus d'un siècle, proposer différentes solutions à ce problème envisagé de façon strictement géométrique.

Dans le sillage immédiat de Morland, à la *Royal Society*, on s'active autour de la *speaking trumpet*, et, dès 1672, Hooke, Jonathan Goddard et John Conyers travaillent à l'amélioration du prototype de Morland. Mais l'enthousiasme pour ce qui pourrait apparaître comme une distraction de savant finit par s'épuiser, et seul Conyers persévère pendant encore quelques années<sup>551</sup>. Le sujet traverse alors la Manche, et c'est sur le continent que les recherches se poursuivent.

### Jean-Baptiste Denis

L'appel de Morland sera bientôt entendu. En 1672, la publication du *Journal des sçavans*, organe de la toute jeune Académie des Sciences de Paris, est suspendue. Elle est remplacée par un 'supplément' publié à Amsterdam par J.B. Denis, le '*Recueil des mémoires et conférences concernant les arts et les sciences*' qui rassemble les publications mensuelles de mémoires présentés par certains savants. Dès le premier mémoire daté de février 1672<sup>552</sup>, Denis introduit le sujet en présentant le *Tuba stentoro-phonica* de Samuel Morland et se propose de publier prochainement la traduction française de son mémoire. Elle fera l'objet du second numéro de la revue<sup>553</sup>, en février 1672. La publication de ce second mémoire ne passera pas inaperçue.

<sup>551</sup> voir Penelope Gouk, *Acoustics in the early Royal Society*, in *Notes and records of the Royal Society of London*, 1982, 36, n 2, p. 165.

<sup>552</sup> *Recueil des mémoires et conférences sur les arts et les sciences*, présentées à Monseigneur le Dauphin pendant l'année 1672, par Jean-Baptiste Denis, p. 1-5.

<sup>553</sup> *Id.* p. 13-31.



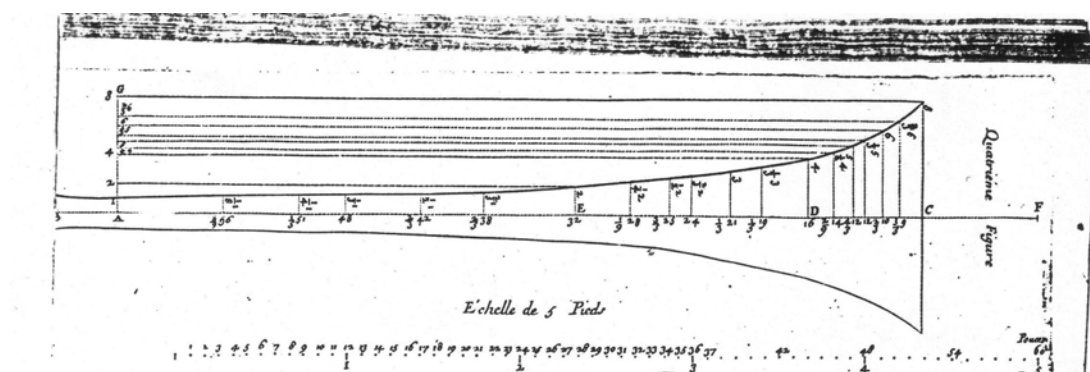
En effet, dès avril 1672, M. de Bercé, de Chartres, fait parvenir au *Journal des sçavans* une lettre de Monsieur Cassegrain qui propose une solution au problème soulevé par Morland sur les proportions à donner à la trompette à parler de loin. Cette lettre est publiée dans le numéro de mai 1672 des *Mémoires concernant les arts et les sciences*<sup>554</sup>, après un court exposé de Denis sur diverses expériences réalisées antérieurement sur ces fameuses trompettes, aussi bien à Paris qu'en Italie. C'est que la publication de la traduction du mémoire de Morland a provoqué de nombreuses réactions, et « il s'est trouvé des personnes qui ont prétendu que cette invention n'étoit pas nouvelle, et qu'elles avoient vu dans Paris de ces sortes de trompettes entre les mains de divers particuliers il y a plus de quinze ans »<sup>555</sup>. Un ouvrier, après avoir vu le modèle de cinq pieds et demi présenté par Denis, a affirmé en avoir réalisé deux semblables, 18 ans auparavant, l'une pour un 'musicien de la Campagne', l'autre pour le R.P. Salar, chanoine régulier de St Augustin. Denis est allé voir le père Salar qui lui a confirmé, et qui lui a expliqué comment l'idée lui était venue,

parce qu'il avait reconnu par expérience que la voix s'étoit augmentée notablement par le moyen d'un simple cornet de carton dans lequel il s'avisait un jour de chanter. Il m'avoia qu'il n'avoit pas eu le dessein du Chevalier Morland, qui est de s'en servir pour parler de loin, mais que tout son but avoit esté d'essayer à remplir par cet instrument un chœur de musique, puis qu'en y chantant d'une voix assez modérée, cela surpassoit la force des serpens et des bassons dont on se sert ordinairement dans la musique<sup>556</sup>

Denis fait ensuite référence, à la suite de sollicitations, aux écrits de Kircher.

## Laurent Cassegrain

Laurent Cassegrain (1629 – 1693) est curé de Chaudon et professeur au collège Pocquet de Chartres. Lorsqu'on cite Cassegrain, c'est en général comme l'inventeur du télescope à miroir, ancêtre de nos instruments modernes. Ce savant méconnu tombera dans l'oubli devant la notoriété de Newton qui au même moment propose son propre modèle de télescope<sup>557</sup>. Cependant Cassegrain fait preuve d'anticipation avec son porte-voix, puisque la courbe exponentielle qu'il propose est une des formes retenues de nos jours dans les équipements de diffusion sonore directive et intense. Pour la forme idéale du porte-voix, Cassegrain propose une proportion harmonique entre la largeur (le diamètre) et la longueur de l'instrument. Sa démarche est peu claire, il invoque la construction des cloches et pense que les rapports harmoniques doivent être représentés dans le calcul de la forme idéale. Pour cela Cassegrain détermine sur un axe, celui du rayon de l'appareil, des divisions correspondant aux puissances de 2, c'est-à-dire aux octaves, de 2 à 8, en partant d'un rayon de 1 pouce. Puis, sur l'autre axe, longitudinal, il part du pavillon, c'est-à-dire du grand diamètre de la trompette, reporte la grandeur 8 provenant de la largeur, et ajoute son double, 16 donc, et encore son double, 32. La longueur totale est donc de 56 pouces. Cassegrain trace ensuite la courbe avec des points intermédiaires correspondants aux rapports harmoniques issus de la division du monocorde, en usage chez les théoriciens de la musique.



<sup>554</sup> 'Lettre écrite de Chartres par M. Cassegrain sur les proportions de la trompette à parler de loin'in *Recueil des mémoires et conférences sur les arts et les sciences, présentées à Monseigneur le Dauphin pendant l'année 1672*, par Jean-Baptiste Denis, p.115-120.

<sup>555</sup> *Id.* p. 110.

<sup>556</sup> *Id.* p. 110-111.

<sup>557</sup> Au sujet du télescope de Cassegrain et de la vie de ce savant oublié, il existe un remarquable article de Françoise Launay et André Baranne, 'Cassegrain : un célèbre inconnu de l'astronomie instrumentale'in *Journal of Optics* 28 (1997) p 158-172.

L'expression mathématique d'une telle courbe, construite à partir de points déterminés, est  $f(x) = 64(1 - 1/2^x)$ , nous sommes donc bien en présence d'une exponentielle, d'autres, plus tard, parleront d'hyperbole....Quoi qu'il en soit, Cassegrain a sans doute été proche de la solution la plus efficace. D'autre part, son explication ne fait pas appel à la réflexion des 'rayons' sonores, mais se révèle très intuitivement proche de la réalité physique du phénomène :

[...] L'air sortant de la bouche de l'homme qui parle, et se faisant entendre à cause de son tremblemens, il imprime ce tremblemens premierement vers l'embouchoir, les premiers cercles du tube estans meus disposent les autres au mouvement, et l'air survenant avec ces tremblemens, acheve de faire dans les autres, ce que les premiers avoient commencé.

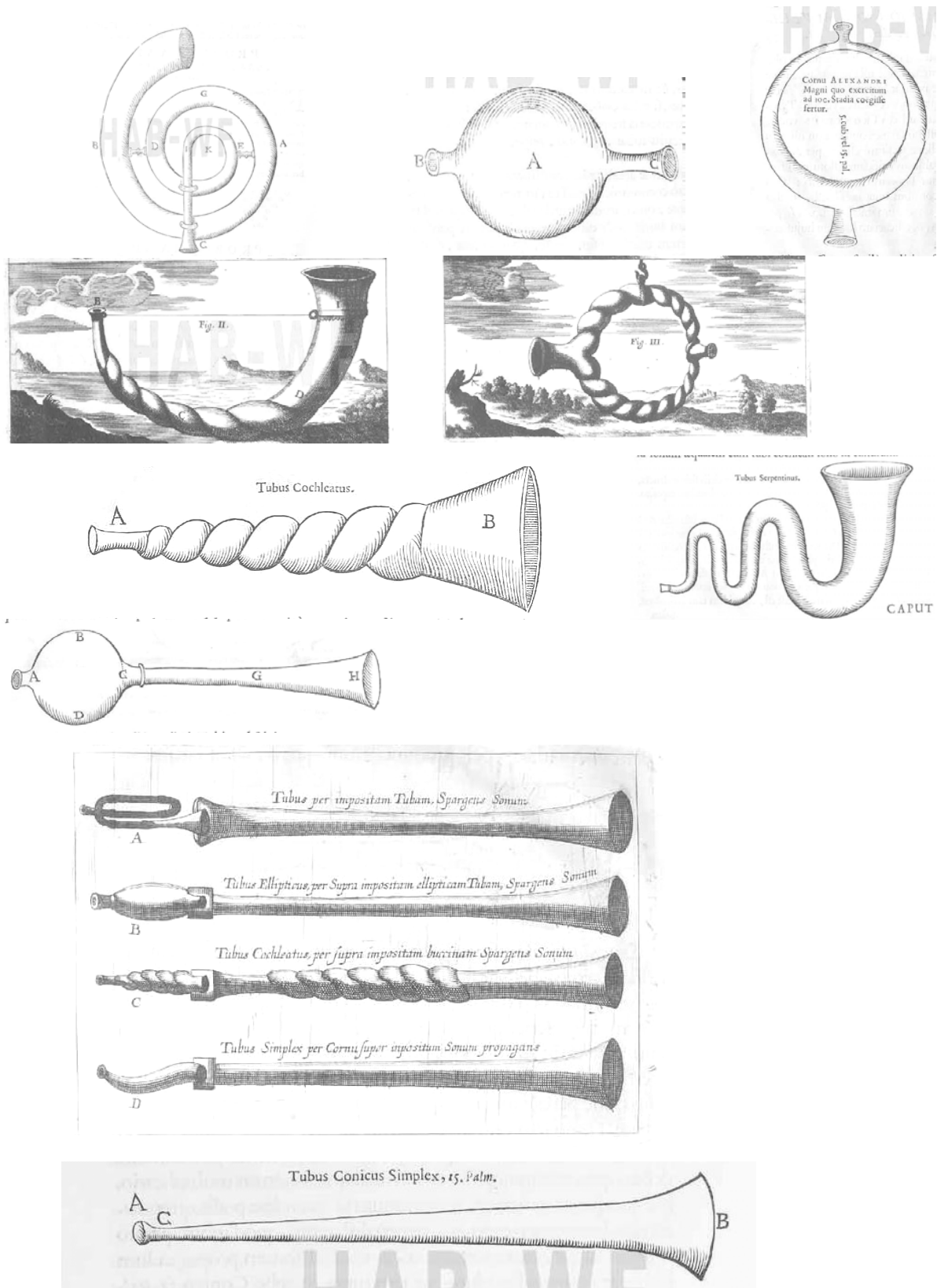
Nous sommes bien loin ici des trajectoires et de la géométrie, Cassegrain nous expose comment l'état du mouvement de l'air est une fonction de son état précédent, nous ne sommes pas éloignés des futures équations aux différences de D'Alembert (équations aux dérivées partielles).

### La réponse de Kircher

Après la parution de l'article de Morland en 1671, et sa traduction en français par Denis, Kircher réagit et revendique avec véhémence l'antériorité de l'invention dans son *Phonurgia* qui paraît en 1673<sup>558</sup>. Son argumentation est appuyée par deux disciples, dont Gaspar Schott, qui affirment que Kircher a bien réalisé un tel instrument dans les années 1650. On peut penser que les exécutions réalisées à la demande du père Salar l'avaient été sur proposition plus ou moins directe de Kircher, mais nous en avons aucune trace. Concédonsons à Kircher que dans son *Musurgia* il avait largement développé le sujet, qu'il était sans doute le concepteur du porte voix, et que sans doute Morland s'en est inspiré<sup>559</sup>. Piqué au vif par le succès de l'invention de Morland, Kircher se déchaîne dans *Phonurgia*, et propose un véritable catalogue de porte-voix, dont la forme s'inspire toujours des courbes et volutes auxquelles il attribue des vertus amplificatrices considérables. On remarquera la présentation condescendante par Kircher du modèle inspiré par Morland et Cassegrain, le *Tubus conicus simplex* (sans doute moins performant, mais bien moins cher que le *Tubus cochleus...*).

<sup>558</sup> A. Kircher, *Phonurgia Nova Sive Conjugium Mechanico-physicum Artis & Naturæ Paranymphea Phonosophia concinnatum* ..., Campidona (Kempten), 1673.

<sup>559</sup> *Musurgia*, de Kircher avait été tiré à plus de 500 exemplaires, ce qui est considérable à cette époque (1650) pour un ouvrage savant. Cela explique sans doute l'influence de sa théorie auprès de la communauté scientifique.



Quelques Porte-voix présentés par Kircher dans *Phonurgia* (1673)

## Hautefeuille

Jean de Hautefeuille (1647-1724) est un savant oublié qui a eu la malchance de se trouver sur le chemin de Huygens. Hautefeuille et Huygens se sont querellés, avec la contribution de Hooke, sur la paternité du ressort spiral équipant les montres. C'est Huygens qui a eu le dessus, et c'est ce qui a valu à Hautefeuille de

rester à la porte de l'Académie Royale des Sciences. Il publie quelques articles dans le *Journal des Savants* et Varignon, après la mort de Huygens, parlera, en vain, de ses travaux au cours d'une séance de l'Académie.

En 1673, deux ans après la parution de l'article de Morland, Hautefeuille écrit un court traité sur le porte-voix<sup>560</sup>. Savant isolé et démuné, il entreprend la fabrication d'un l'instrument en carton, faute de moyens, et expérimente seul l'effet de sa trompette. Il cite les tentatives de Gallois d'une trompette à quatre pavillons, ainsi qu'une autre, confectionnée par d'Alancé sur le modèle de celle d'Alexandre. Hautefeuille est alors en contact avec certains membres de l'Académie qu'il rêve de rejoindre. Reprenant l'expérience de Morland avec le vif-argent, il la démonte en expliquant que les cercles se formeront quelle que soit la forme de l'objet et l'emplacement du choc initial. Il évoque Cassegrain mais rejette son manque d'explication du phénomène. Enfin il réfute l'analogie avec les rayons de lumière et les théories de Kircher.

Se rangeant à l'avis de 'quelques savants', sans doute Fabri, il développe l'idée selon laquelle plus l'espace de diffusion du son est fermé, par le sol, puis par une paroi, puis par deux, etc., plus le son aura tendance à conserver son intensité. En effet, selon la définition de la pression comme le rapport d'une force à la surface, l'atténuation du son est proportionnelle à la surface de la sphère, et sur un secteur de sphère, l'atténuation sera moindre que lorsque le son se diffuse à l'air libre. Il cite comme exemple les 'abat-sons' qui couvrent les chaires des prédicateurs, et c'est intéressant car son explication est contraire à la théorie couramment admise qui veut que ce soient les réflexions du son qui l'amplifient. Cette approche pascalienne qui fait appel à la notion de pression est audacieuse et n'est pas encore très développée. Hautefeuille fait à nouveau appel à Pascal et évoque l'expérience de la pression de l'eau qui permet de percer un tonneau plein grâce à un petit tuyau placé sur le dessus. Il tente une analogie pour expliquer le fonctionnement des tuyaux d'orgues et des trompettes parlantes, hyperbolique ou parabolique, pour ne retenir que l'accroissement progressif du pavillon. Par ailleurs, son infortune lui a permis de démontrer que la matière de l'instrument n'entre pas en jeu, si ce n'est pour modifier légèrement le timbre de la voix. Enfin il constate que les sons aigus sont peu amplifiés.

Hautefeuille, malgré une certaine maladresse dans le maniement des notions physiques, fait preuve d'une anticipation certaine, sans doute fortuite, et se place en quelque sorte en décalage avec ses contemporains.

## Christiaan Huygens

Stimulé par le défi de Morland, Oldenburg, animateur de la communauté scientifique londonienne au sein de la Royal Society, fait part à Huygens de l'invention et l'interroge à ce sujet. Quelque temps après Oldenburg échangea quelques lettres à ce sujet avec Pardies<sup>561</sup>. Le savant hollandais est peu inspiré par le sujet, l'invention du télescope à miroir de Newton le passionne bien plus, et sans doute sa querelle avec Hautefeuille, qui commençait alors ses recherches sur le porte-voix, ne l'engage pas à débattre avec lui. Sa réponse à Oldenburg est on ne peut plus prudente :

« [...] Le problème touchant la meilleur figure pour cette trompette seroit difficile à résoudre, et il faudroit auparavant avoir bien des connaissances, en ce qui concerne la nature du son et que nous n'avons pas encore »<sup>562</sup>

La prudence de Huygens vire au scepticisme quand il a l'occasion de procéder à des essais, ainsi qu'il le rapporte dans une lettre à son frère Louis :

« [...] Hier après disner je fus avec 5 ou 6 de nos curieux à Issy chez Monsieur Thevenot, où nous fismes des experiences avec des trompettes parlantes comme vous savez qu'on en a inventez en Angleterre. Il y en avoit de huit differentes facons [...] mais l'on trouva que la forme n'y fait pas beaucoup. L'effet aussi en general n'en est pas si grand que ces Messieurs les anglois nous ont fait accroire, car elles ne se font entendre qu'environ deux fois si loin que la voix sans trompette. »<sup>563</sup>

Dans le manuscrit de l'article que Huygens envoie début 1672 au *Journal des Savants*, au sujet de la lunette de Cassegrain, il se fait encore plus incisif :

[...] La construction de la trompette est sans aucun fondement puisqu'il ne paraît point de raison pourquoi les proportions que l'on y voit observées devraient produire quelque effet en ce qui regarde la multiplication ou renforcement du son dont il s'agit [...]

Au reste la ligne courbe de sa trompette est précisément l'hyperbole, comme il serait facile à démontrer, et si l'expérience faisait voir peut-être que cette figure fait un meilleur effet qu'aucune autre pour le grossissement du son, il en faudroit chercher la raison dans les propriétés de cette

<sup>560</sup> Jean de Hautefeuille, *Explication de l'effet des trompettes parlantes*, Paris, Coignard, 1674.

<sup>561</sup> Oldenburg, *Correspondance*, vol. 9, Pardies to Oldenburg, 21 mai 1672. (cité par Penelope Gouk).

<sup>562</sup> Christiaan Huygens, *Lettre à Oldenburg*, 13 février 1672, in *Œuvres complètes*, t. 7.

<sup>563</sup> Christiaan Huygens, *Lettre à Lodewijk Huygens*, 5 août 1672, in *Œuvres complètes*, t. 7.

ligne, après avoir trouvé premièrement des principes en ce qui regarde la nature du son et les manières de la produire. (Huygens, *Œuvres complètes*, t 13, p. 804)

Huygens, qui a pourtant beaucoup écrit sur la musique et les tempéraments, n'est pas du tout inspiré par l'étude de la propagation des sons, qu'il évoque pourtant au début du *Traité de la lumière* pour en décrire le caractère ondulatoire. C'est son ami Claude Perrault qui se chargera, au sein de l'Académie des Sciences, de traiter ce sujet.

Huygens refuse la théorie de la réflexion des sons sur les parois, puisqu'il développe une théorie ondulatoire de la propagation des sons, ainsi que de la lumière. Cette théorie ne peut pas se satisfaire d'une simple mécanique des chocs telle que la présente Kircher. Parallèlement l'étude récente des propriétés de l'air, l'élasticité et la compressibilité, induisent d'autres processus dans la propagation aérienne des sons, et Huygens semble plutôt se méfier de la fiabilité des expériences. Dans tous les cas, il s'en remet à l'étude du phénomène qui ne manquera pas de se réaliser dans les années à venir.

## Claude Perrault

Claude Perrault, médecin, architecte, naturaliste et physicien, membre de l'Académie Royale des Sciences, est un ami de Huygens. Il entreprend, suite à une commande de Colbert à l'Académie, la rédaction d'un volumineux traité de physique dont un livre entier est consacré à l'acoustique, le *Traité du bruit*. Il y développe une théorie de la propagation presque ondulatoire, fondée sur le mouvement alternatif de parties d'air provoqué par une succession de compressions et de dilatations. Parlant des différentes formes de réflexion du son, il crée la notion de 'verbération', sorte d'échos multiples confondus, qui préfigure la 'réverbération' d'aujourd'hui.

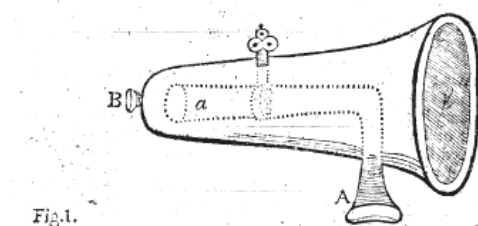
Perrault ne pouvait pas ignorer le porte-voix, qu'on appelle encore 'trompette parlante' à cette époque. Pour expliquer son effet, il fait appel à la fois à la propriété de 'verbération' dans la cavité conique, et à la capacité de cette forme à permettre aux particules d'air de propager progressivement leur mouvement à celles de l'air extérieur. On est très près de l'interprétation actuelle du phénomène<sup>564</sup> :

[...] Il est aisé de concevoir qu'un bruit qui est petit à cause du peu de particules que la collision de deux corps qui se frappent en peu d'endroits a émues, peut s'accroître par une seconde émotion que souffrent un grand nombre d'autres particules agitées par la réflexion du premier bruit. La raison de cela est que le retour des particules froissées dans le premier bruit, ayant une promptitude extrême, elles remuent l'air avec une promptitude pareille, ou qui n'est guère moindre. Or cet air ainsi poussé ayant le pouvoir de pousser les corps voisins avec une égale force, il s'ensuit que l'élargissement du pavillon lui donnant et lui présentant un plus grand nombre de particules pour être frappées, un plus grand bruit en doit être produit.

Lorsque Perrault parle de réflexions, il ne s'agit plus ici des 'rayons sonores' chers à Kircher, mais de 'verbération', c'est-à-dire d'un renforcement de l'intensité par la résultante du son direct et des multiples répercussions sur les parois. Ces répercussions, par leur multiplicité, frappent un plus grand nombre de particules et contribuent progressivement à accroître l'intensité. De même, l'élargissement progressif du pavillon permet aux particules d'air en mouvement de le communiquer à un plus grand nombre, contribuant ainsi à l'augmentation de l'intensité.

## John Conyers

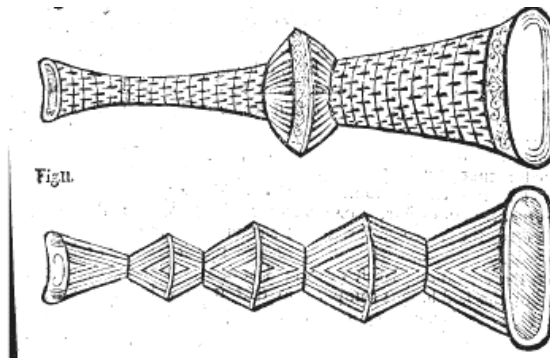
En 1678, dans les *Philosophical Transactions*, paraît un court article illustré de John Conyers, qui propose une *reflecting trumpet*, meilleure, dit-il, que la *speaking trumpet* de Morland<sup>565</sup>. Le principe est fondé sur les réflexions des 'rayons sonores' sur une paroi formant le sommet d'une 'pyramide concave', on en saura pas plus, mais on suppose qu'elle est parabolique. Le son est dirigé vers ce lieu au moyen d'un tube coudé qui plonge à l'intérieur de la cavité, et dont l'embouchure se situe à l'extérieur.



<sup>564</sup> Claude Perrault, *Essais de physique*, tome 2, *du bruit*, Paris, 1682, p. 153.

<sup>565</sup> John Conyers, 'Improvement of Samuel Morland's speaking trumpet', in *Phil. Trans.* 1678, t 12, p. 1027.

Conyers fait également quelques variations sur le même thème, en suggérant une trompette dont la partie tubulaire est interrompue par des cavités, sortes de cellules d'amplification des ondes sonores, comme dans les tubes ellipsoïdes de Kircher. Les résultats, d'après Conyers ne sont pas concluants, mais rendons lui cet hommage d'avoir au moins essayé.



Les tentatives de Conyers n'ont pas laissé un grand souvenir dans l'histoire de l'acoustique, mais elles peuvent montrer à quel point ces premières années de 'philosophie naturelle' ou expérimentale ont été fécondes en projets de toutes sortes.

### Narcissus Marsh (1638-1715)

A côté de ces recherches spéculatives, on retrouve toujours cette influence obscure des jésuites, comme chez cet ecclésiastique anglais, Narcissus Marsh (1638-1715), fervent adepte d'un rigoureux parallèle entre son et lumière. Dans un texte publié dans les *Philosophical Transactions* en 1684<sup>566</sup>, Marsh attribue l'amplification des sons dans le porte-voix à la réfraction du son dans l'air contenu à l'intérieur du cône :

"As for the speaking trumpet by which a voice may be conveyed to a considerable distance, I refer its consideration to that of refracted sounds or refracted audition. [...]"

[...] as any object (a man for exemple) seen through a thicken'd air, by refraction appears greater then really he is; so likewise a sound, heard through the same thickned part of the atmosphere, will be considerably vary'd from what it would seem to be, if heard through a thinner medium.

And this I call a refracted sound."

Pour Marsh le son se propage comme la lumière, c'est son hypothèse de départ. Qu'est ce qui fonde cette hypothèse ? Sans doute comme chez Kircher l'analogie entre la réflexion lumineuse sur les miroirs et le phénomène de l'écho. Et Marsh extrapole, puisque le son se réfléchit, il doit aussi se réfracter, ce qui n'est pas vraiment faux, on en fera l'expérience au XIX<sup>ème</sup> siècle. Mais l'analogie, chez Marsh doit forcément s'appliquer à un dispositif comparable aux lentilles convergentes, c'est-à-dire à un procédé d'amplification de l'intensité sonore. Le porte-voix amplifie le son, c'est donc qu'il agit par réfraction. A partir de là, il est plausible d'imaginer, et Marsh s'y risque : il propose la construction d'équivalents sonores d'instruments optiques, et n'hésite pas à 'inventer' le microphone :

"As microscopes or magnifying glasses, help the eye to see near objects, that by reason of their smallness were invisible before; which objects they magnify to a strange greatnes; so microphones or micracousticks, that is magnifying ear instruments may be contrived after that manner, that they shall render the most minute sound in nature distinctly audible, by magnifying it to an unconceivable loudness."

Pas d'expérimentation chez Marsh, juste une construction intellectuelle fondée sur une comparaison certes séduisante, mais largement insuffisante et finalement erronée. L'article publié ne donne lieu à aucune réponse et sa théorie est semble-t-il rapidement tombée dans l'oubli.

### Isaac Newton

En 1687 paraît la première édition, en latin, des *Philosophiae naturalis principia mathematica* d'Isaac Newton. C'est un des ouvrages essentiels de l'histoire de la physique, qui présente les théories de Newton sur la mécanique et l'astronomie. La section VIII du livre 2 traite de la 'propagation du mouvement dans les

<sup>566</sup> Narcissus Marsh, 'A doctrine of sounds...' in Phil. Trans. 156, 1684, p 472-488.

fluides'élastiques ou non. Les dernières propositions traitent du son, et à la fin de ce chapitre, Newton parle en quelques lignes du porte-voix, comme pour apporter sa contribution attendue au débat en cours.

Sed et cur soni in Tubis Stentorophonicis valde augentur, ex allatis principiis manifestum est. Motus enim omnis reciprocus singulis recursibus à causa generante augeri solet. Motus autem in Tubis dilatationem sonorum impediuntibus tardius amittitur et fortius recurrit, et propterea à motu novo singulis recursibus impresso magis augetur.<sup>567</sup>

La célèbre traduction française des *Principia* par la Marquise du Châtelet est éditée à Paris en 1759 et le Tuba stentorophonica est désormais dénommé porte-voix :

[...] On voit aussi, par les principes qu'on a posés, pourquoi les sons augmentent dans les porte-voix. Car tout mouvement réciproque a coutume d'augmenter à chaque réflexion par la même cause qui le produit. Ainsi le mouvement se perd plus tard et se réfléchit plus fortement dans les tubes qui s'opposent à la dilatation du son, et par conséquent, il s'augmente par le mouvement nouveau imprimé à chaque réflexion.<sup>568</sup>

L'usage que Newton fait des mots en latin n'est pas neutre, et comme souvent, la traduction n'apporte pas les nuances nécessaires. Si Newton emploie les termes *recursus* et *recurrere*, alors que *reflexio* et *reflexere* sont à sa disposition, ce n'est pas par effet de style, et la traduction (de la Marquise du Châtelet) par 'réflexion' et 'se réfléchir' est inappropriée. Si le sens général de *recurrere* est de rebrousser chemin, avec une idée de retour en arrière, *reflexere* implique d'abord une flexion, une action de tordre en arrière. On voit bien, dans la 'réflexion', l'idée d'angle formé par le rayon lumineux, comme brisé par l'obstacle qu'il rencontre. Newton évoque plutôt un rebroussement du flux sonore, un retour en arrière, presque une inversion. Et c'est en effet ce qui se produit lorsqu'une onde sonore parcourt un tube : venant buter à son extrémité contre l'air extérieur inerte, l'onde se retourne et revient en arrière, elle rebrousse chemin. Il s'agit ici d'un autre phénomène que celui de la 'réflexion' décrit par le modèle lumineux, qui est une modification de trajectoire. Dans le cas du porte-voix, ce que suggère Newton, c'est que cette onde inverse vient renforcer, après une deuxième inversion, l'onde principale, et donc accroître son intensité. Le tube, par son volume, confine le flux sonore (*in Tubis dilatationem sonorum impediuntibus*), et fait obstacle à sa dilatation. Ce flux se divise, en quelque sorte (*tardius amittitur et fortius recurrit*), une partie vers l'extérieur, qui se perd plus lentement, et une partie vers l'intérieur, qui revient en arrière plus fortement. Le son s'amplifie donc par l'augmentation de pression (*impresso*, d'*imprimere*, 'faire pression', et pas seulement 'imprimer') permise à chaque retour (*singulis recursibus*) de l'onde à son origine. Il semble bien que Newton ait pressenti cette propriété essentielle de la propagation des ondes, qu'on finira bien par nommer 'réflexion', mais qui n'a pas grand chose à voir avec les trajectoires des 'rayons sonores' de Kircher. Cette propriété est essentielle pour la compréhension des tubes sonores, puisqu'elle est à l'origine des ondes stationnaires qui font sonner les tuyaux d'orgues, les flûtes et les trompettes. Dans les porte-voix, cette propriété est en effet mise à contribution pour une partie de l'amplification des sons, l'autre partie étant assurée par le pavillon qui permet au flux sonore de s'adapter progressivement à l'inertie de l'air extérieur, on l'apprendra bien plus tard en créant le concept d'impédance acoustique.

### Johann Christoph Sturm (1635-1703)

Johann Christoph Sturm (1635-1703) enseignait la physique à l'université d'Altdorf, près de Nuremberg et professait une méthode basée sur la curiosité et les expériences. Il publie un *Collegium Experimentale sive Curiosum* ('le collège expérimental ou curieux', mais *curiosus* peut également se traduire par 'minutieux' ou 'scrupuleux'), traité en deux parties (1679 et 1685) dans lesquels il relate un certain nombre d'expériences de physique dont celle d'un porte-voix <sup>569</sup>.

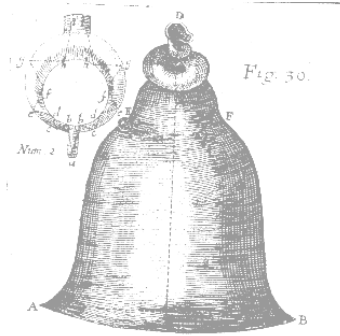
Sturm, quoique de tradition germanique, est fortement influencé par la culture expérimentale anglaise, Bacon, Boyle, Hooke, et la Royal Society. Il fait un historique détaillé de la question du Tuba stentorophonica, et cite Morland, Cassegrain, et bien entendu Kircher. Puis il nous présente un modèle qu'il a fait fabriquer, selon les proportions de Cassegrain, mais en cuivre, métal plus sonore que le fer d'après lui. Enfin Sturm décrit un Tuba confectionné à Nuremberg, d'une forme un peu particulière, proche d'une cloche. Le tube est enroulé sur

<sup>567</sup> Isaac Newton, *Philosophiae naturalis principia mathematica*, Londres, 1687, Lib II, Sect VIII, Scholie, p. 372.

<sup>568</sup> I. Newton, *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, trad. de Mme du Chastellet, Paris, 1759, p. 412.

<sup>569</sup> J.C. Sturm, 'De tubis stentoreo-phonice sive acusticis' in *Collegium curiosum*, Altdorf, 1685, *tentamen VIII*, p. 142

lui-même et c'est le pavillon qui représente la masse de l'appareil. Plus maniable, nous dit Sturm, ce modèle obéit en outre aux préceptes de Kircher selon qui les courbures amplifient le flux sonore.



La figure en haut à gauche représente l'inévitable Corne d'Alexandre dessinée par Kircher, qui accompagnera toutes les études sur le porte-voix jusqu'au XIX<sup>ème</sup> siècle.

La partie supérieure de l'appareil est constituée du tube reliant l'embouchure au pavillon, enroulé sur lui-même.



le dessin de gauche est l'agrandissement de l'embouchure du dessin de Sturm, celui de droite est une interprétation. On voit distinctement les circonvolutions décrites par Sturm.

Il est clair que Sturm s'intéresse ici plus à la maniabilité de l'engin qu'à son efficacité dont il nous dit peu de choses, mais qu'il décrit supérieure à son modèle en cuivre.

D'autres tentatives de quête de la forme idéale pour amplifier les sons vont apparaître.

### Willem Jacob s'Gravesande

Willem Jacob 's Gravesande (1688-1742) était un savant des Pays Bas adepte de la physique de Newton. Il écrit un traité de physique inspiré des *Principia* paru en 1721<sup>570</sup>. Dans un chapitre consacré au son, il propose une forme idéale pour le pavillon du porte-voix<sup>571</sup> :

La réflexion augmente le son dans un tube : comme il paraît dans les trompettes parlantes. La figure la plus parfaite de toutes, qu'on puisse donner à ces trompettes, est celle qui serait formée par la circonvolution d'une parabole autour d'une ligne parallèle à son axe, et éloignée de cet axe d'un quart de pouce. Car si en parlant on place la bouche dans l'axe de la machine, et au foyer de la parabole, les ondes sont réfléchies, en sorte que chacune de leurs parties acquiert un mouvement parallèle à l'axe de la machine; ce qui augmente beaucoup la force de l'onde et celle du son. Les bords de la plus grande ouverture, par laquelle le son sort, doivent s'élargir en forme de lèvres, pour que l'onde se disperse plus facilement de toutes parts.

La trompette parlante de Gravesande ressemble donc à celle de Conyers, de forme parabolique avec l'embouchure au foyer. Cependant, Gravesande, qui ne produit pas de dessin pour ce modèle, ne résout pas le problème de cette embouchure. Car là où Conyers avait habilement disposé un tube qui part de l'extérieur pour aboutir à ce foyer, il n'est pas expliqué comment on peut émettre un son à cet endroit sans pratiquer une ouverture qui disperserait le son en arrière. Curieusement, Gravesande, dans un paragraphe complémentaire

<sup>570</sup> Gravesande Willem Jacob's, *Elemens de Physique demontrez mathematiquement ou introduction à la physique Newtonienne*, Traduction Elie de Joncourt, Leide, J. A. Langerak, 1746.

<sup>571</sup> *id.* t.2, livre IV, chap. 7, p. 69.



consacré aux expériences, décrit et dessine un porte-voix conventionnel, dans la tradition de ceux de Morland et de Cassegrain<sup>572</sup>.

## Les Encyclopédistes

L'Encyclopédie, par la plume de d'Alembert, apporte sa contribution au débat et résume en quelque sorte les positions en présence. Deux articles sont consacrés à l'instrument. Le premier, signé Chambers est traduit et extrait de la *Cyclopedia* parue à Londres en 1728. Chambers y décrit logiquement le tuba de Morland ainsi que ceux de Conyers. Le second n'est pas signé et il est plutôt confus :

PORTE - VOIX, s. m. (*Phys.*) instrumens à l'aide desquels on augmente le son, et on le porte même beaucoup plus loin, que si on ne se servoit pas de ces instrumens. Le son est augmenté par la force élastique du *porte - voix*; car des qu'elle a une fois commencé à frémir à l'aide du son qui la met en mouvement, ce frémissement continue quelque tems; lorsqu'il y a un long intervalle entre le premier son & les derniers frémissemens de la trompette, nous pouvons alors distinguer le premier son du dernier; ce qui produit un éclat ou retentissement, lequel fait que le son qui part du *porte - voix*, n'est pas si distinct, que si l'on parloit sans l'aide de cet instrument: par conséquent, si on veut se faire entendre à une grande distance par le moyen d'un *porte - voix*, il faut prononcer chaque parole bien distinctement, afin que le bourdonnement ne cause aucune confusion.

Cet article de l'Encyclopédie qui pourtant propose des explications détaillées et mathématiques de beaucoup de phénomènes physiques, montre assez bien le désarroi des savants à cette époque pour expliquer le processus d'amplification du son dans le porte-voix. Son utilisation est alors répandue, en particulier dans la marine, mais personne ne songe à dépasser la simple intuition.

## Jean-Henri Lambert

Jean-Henri Lambert (1728-1777) est un grand mathématicien originaire de Mulhouse alors ville suisse. Sa formation est essentiellement autodidacte et il profite de sa fonction de précepteur d'une riche famille suisse pour lire et voyager. Ses premiers écrits concernent l'optique géométrique et, entré vers 1760 à l'Académie des Sciences de Berlin, il produit de nombreuses recherches en mathématiques, en astronomie et en physique. En 1763 l'Académie des Sciences de Berlin publie, dans ses mémoires, un des premiers articles de Lambert intitulé 'sur quelques instruments acoustiques'. Il s'agit sans doute d'un texte écrit vers 1759, lorsque Lambert enseignait en Bavière et prenait connaissance des ouvrages allemands sur la propagation des sons. Car cet article, malgré son nom général, ne traite que de la théorie du porte-voix. Il s'agit de ce qu'on peut qualifier 'article de jeunesse', ce qui explique une certaine maladresse puisque l'hypothèse développée est très éloignée des thèses alors admises par de nombreux scientifiques que Lambert semble alors ignorer.

Dès le début de son texte, Lambert définit la propagation du son comme semblable à la lumière et s'enferme dans les théories de Kircher sur les rayons sonores qu'il nomme phoniques, et la réflexion de type catoptrique<sup>573</sup>:

[...] On sait que la propagation du son se fait en ligne droite [...]

[...] Ensuite on sait que le son se réfléchit [...]

[...] Quant à la réflexion du son, on sait encore qu'il en est comme de toutes les autres réflexions, c'est-à-dire que l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence. C'est sur cela que se fonde le moyen de construire et de créer, pour ainsi dire, des échos artificiels.

Suit un rappel de la théorie de Newton qui conteste cette approche en exposant que le son, après être passé par une fente dans un mur, se disperse de façon sphérique à partir de cette nouvelle source, contrairement à la lumière qui se propage dans un cône. Lambert semble alors invoquer Euler qui contesterait Newton sur ce sujet<sup>574</sup>. C'est alors que Lambert se lance dans une description, que Kircher n'aurait pas renié, du phénomène de l'écho selon des trajectoires représentant les supposés rayons phoniques<sup>575</sup>:

[...] On voit donc par là que, moyennant la réflexion, on peut intercepter un cône ou une pyramide sonore, et donner au son une direction linéaire, comme on peut la donner à la lumière.

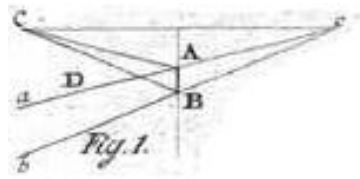
<sup>572</sup> *id.* planche LXXVI.

<sup>573</sup> Jean Henri Lambert, *Sur quelques instruments acoustiques*, in Mémoires de l'Académie des Sciences de Berlin, 1763, p. 90-91.

<sup>574</sup> Ce n'est pas tout à fait le cas. Euler se réfère à Newton et admet sa position dans le texte dont il est question qui est également un ouvrage de jeunesse, *Dissertatio physica de sono*, Bâle, 1727.

<sup>575</sup> *id.* p. 92.

Une figure illustre ce propos :



Lambert s'attaque à un gros morceau, car il est contraint de s'en prendre à la théorie de Newton, et il utilise, comme Kircher, le seul argument de l'écho qui lui semble répondre à son hypothèse. C'est bien entendu contraire à l'expérience, car, même en cas d'écho, le son se fait entendre tout autour du point de réflexion.

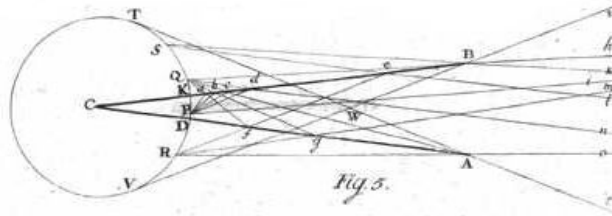
Lambert considère alors la trompette et affirme<sup>576</sup>:

La réflexion du son dans la trompette contribue assez considérablement à augmenter cette accumulation du mouvement oscillatoire des particules du métal.

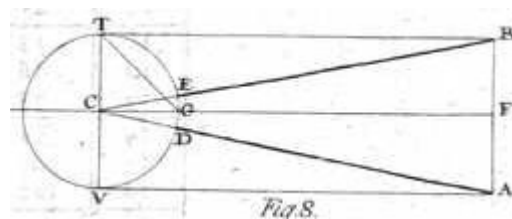
Car pour Lambert, la trompette produit un son par les vibrations du métal et amplifie ce son par les réflexions sur les parois du pavillon. Lambert s'est décidément aventuré imprudemment dans le domaine de l'acoustique. Il concède cependant que pour les porte-voix, la résonance du matériau représente plus un obstacle qu'un avantage, car elle rend les paroles confuses et nuit à la netteté des sons articulés.

Lambert revient donc à la forme de l'instrument et envisage d'abord un simple cylindre. Le son se réfléchit sur les parois et son émission à l'extrémité est donc dirigée selon les rayons sonores qui en sortent. Lambert ne s'attarde pas et il a raison. Cependant pour Lambert l'agmentation de l'intensité est nécessairement liée à la directivité des 'rayons phoniques'. Il cherche à accroître cette directivité au moyen de réflexions sur les parois de l'instrument.

Vient alors une longue démonstration géométrique sur le cas général d'un porte-voix de forme conique et des réflexions supposées des rayons sonores illustrée par de nombreuses figures:



Du point de vue géométrique l'hypothèse est ingénieuse, elle est fondée uniquement sur la directivité des 'rayons phoniques' qui émanent du cône. L'efficacité dépend alors de la détermination de l'angle. Lambert déduit de sa démonstration que le rapport d'intensité sera égal au rapport des deux cordes GT et GE sur la figure :



Lambert examine ensuite la forme parabolique pour en conclure qu'elle n'est pas plus avantageuse que la conique mais plus délicate à confectionner.

On laissera de côté la suggestion de Lambert d'appliquer sa théorie à la lumière pour réaliser des 'porte-lumières'<sup>577</sup> ..

<sup>576</sup> *id.* p. 94.

On a vu que cet exposé était sans doute un travail de jeunesse, ce que n'avaient pas forcément considéré les successeurs de Lambert au XIX<sup>ème</sup> siècle, qui, se fondant sur la réputation alors largement légitime du grand mathématicien, sont allés un peu vite dans une direction bien imprudente.

### **Conclusion provisoire**

Cette recherche bibliographique fait une pause ici, il ne s'agissait ici que d'une présentation, et elle ne présente qu'un aperçu des textes disponibles sur ce sujet qui mérite bien plus de recherches. Ce travail, déjà bien avancé, va être poursuivi.

---

<sup>577</sup> *id.* p.114.

## 8 - Le son et l'air

### *L'écho dans un air élastique*

Vers 1640 plusieurs savants s'intéressent à l'air et à ses propriétés. Torricelli, Pascal, Pecquet, Roberval, puis Guericke, Mariotte, Boyle, Huygens et bien d'autres vers les années 1660. La représentation du son s'en trouve bouleversée, car l'air n'est plus un milieu qui transporte une information sonore par son mouvement en une masse, ni un milieu qui laisse passer des rayons sonores ou les flux de corpuscules. Maintenant l'air est élastique, *elater*, on dit alors qu'il a du ressort.

Ces savants inventent le baromètre, déterminent que l'air est pesant, qu'il est élastique et que le vide existe. Le vide est la grande question de l'air. Jusqu'à la fin du siècle, on fait nombre d'expériences à ce sujet, à la Royal Society, à l'Academia del Cimento de Florence, à celle de Bologne, à l'Académie Royale des Sciences de Paris.

A Londres vers 1660, Robert Boyle observe, à l'occasion d'expériences qui mettent en œuvre une cloche étanche dont on a pompé tout l'air qu'elle contenait, que le son ne se propage pas dans le vide<sup>578</sup>. Mais, en dehors de cette expérience, ceux qui s'intéressent au son ne connaissent pas l'air et les savants qui s'intéressent à l'air n'étudient pas particulièrement le son. À côté des quelques savants jésuites comme Fabri, Grimaldi, Bettini ou Lana Terzi, les savants issus de la pensée rationnelle ne s'y intéressent pas. Mariotte n'en parle pas, Hooke très peu, Newton n'y consacre qu'un chapitre des *Principia*, Huygens, qui pourtant se passionne pour l'acoustique musicale parle du son seulement dans quelques lettres ou extraits de manuscrits. Il semble qu'il ait eu le projet de s'attaquer au problème de la propagation des sons. Cependant on doit à son ami Claude Perrault la publication du *Traité du Bruit*, inclus dans la *Physique* parue en 1684, et dont la lecture avait été faite en séance, vers 1677 à l'Académie des Sciences. À partir du début du XVIII<sup>e</sup> siècle, les expériences se multiplient, et Hauksbee, Brémond et Zanotti font nombre d'observations sur les différences de propagation du son dans l'air en faisant varier les paramètres de température et de pression.

Auparavant, Francis Bacon remarque que « l'air qui se déploie dans un espace où il est tout à fait libre ne produit aucun son, à moins qu'il ne soit vivement frappé », et cite à cette occasion des exemples de mouvements silencieux comme le vent, les déplacements de nuages ou de l'eau des fleuves, ou encore les simples mouvements de corps matériels<sup>579</sup>. Par opposition, le son ne trouble pas le mouvement d'une flamme. Il constate ensuite que pour qu'il y ait un son, il est nécessaire qu'il y ait une concavité et un enfermement de l'air. Bacon a dans le même temps l'intuition du résonateur et des ondes stationnaires qui se forment dans les tuyaux des flûtes : « But where the air is pent and straitened there breath or other blowing suffice to create sound »<sup>580</sup>. Mais qu'entend Bacon par un air 'pent and straitened', est-ce l'air comprimé et resserré ? Il est clair que malgré l'intuition de Bacon, il n'est pas vraiment question de pression ici.

Marin Mersenne, en ce début du XVII<sup>e</sup> siècle si fécond en observations, traite plus profondément le rôle de l'air dans la propagation des sons. Mais il éprouve une certaine difficulté à envisager un mouvement sans transport de matière<sup>581</sup> :

[...] les autres parties de l'air se condensent pour céder à l'impétuosité de la partie agitée, quoiqu'il soit presque impossible de s'imaginer comment se peut faire la compression ou la condensation des parties de l'air, s'il ne contient du vide.

Toujours cette question du vide qui imprègnera tout le siècle.. Il est dommage que Pascal ne se soit pas intéressé au son<sup>582</sup>.

Le bref retour de la conception atomiste de la propagation du son développée à partir d'Epicure, par Beeckman puis Gassendi n'accorde pas une grande place à l'air qui n'est alors que le simple milieu où évoluent les flux de corpuscules sonores.

Les savants jésuites dans un premier temps favorables à la notion de rayons sonores, avec Biancani puis Kircher, effectuent un virage important vers 1660 avec les recherches de Grimaldi sur la lumière. D'une approche un peu archaïque, ils vont alors évoluer vers la théorie moderne des ondulations, et initier cette

<sup>578</sup> Robert Boyle, *New experiments*, 1660, in *The works*, London, ed. Th. Birch, 1772, t. III, p.259-262

<sup>579</sup> Francis Bacon, *Sylva Sylvarum*, 1626, centurie II.

<sup>580</sup> *Ibidem*.

<sup>581</sup> Marin Mersenne, *Harmonie Universelle*, Paris, 1637, livre I.

<sup>582</sup> Pourtant, selon sa soeur Gilberte Périer, il aurait écrit à l'âge de 12 ans un petit traité sur le son 'qui fut trouvé tout à fait bien raisonné'. (Gilberte Périer, *Vie de Pascal*, Paris, Vaton, 1845, p. 4)

modélisation très abstraite à cette époque malgré la conventionnelle image des ronds dans l'eau que les savants commencent à refuser de plus en plus à cause de son inadaptation à la réalité observée.

### **Claude Perrault et son 'agitation de l'air qui cause le bruit'**

Claude Perrault, très lié à Huygens qu'il invite souvent dans la propriété familiale de Viry, est médecin, architecte, naturaliste et physicien. Il est le traducteur du *Traité d'architecture* de Vitruve, et par ailleurs membre très actif de l'Académie des Sciences. Dès 1677 on fait, en séance<sup>583</sup>, la lecture d'un long *Traité du bruit* qui trouvera sa place dans ses *Essais de physique* parus en 1680. Claude Perrault ne connaissait l'acoustique que par la traduction de Vitruve qu'il avait faite et on est surpris de sa perspicacité à la lecture de ce traité<sup>584</sup>. Il s'explique dans la préface sur l'intitulé de l'ouvrage, voulant se démarquer clairement de l'acoustique musicale et ne traiter les sons que dans ce qu'ils ont de brut, sans connotation culturelle. Perrault reprend l'analogie des ondes à la surface de l'eau, mais il en fait un commentaire critique. Le terme 'ondulation' désigne à l'époque ce mouvement d'une déformation d'un fluide perturbé, il n'a pas le caractère général qu'on lui donne de nos jours. A la notion d'ondulation de l'air, Perrault préfère 'l'agitation de l'air qui cause le bruit'. Il se méfie de cette analogie des ronds dans l'eau qui représente mal, selon lui, le processus de propagation. Il propose alors une hypothèse nouvelle : les particules d'air qui font ressort se déplacent dans de très petits espaces et à grande vitesse<sup>585</sup> :

Mon opinion est que cette agitation si particulière qui, pour produire le bruit doit se rencontrer et dans les corps qui se choquent et dans l'air qui en est ému pour ensuite pouvoir frapper l'organe de l'ouïe, consiste en deux choses, savoir : dans la petitesse de l'espace et dans la promptitude du temps dans lequel elle se fait.

Le concept central de la théorie de Perrault se résume à cette expression 'l'agitation particulière de l'air qui cause le bruit'. Ce qui est agité, ce sont des particules de matière, air, fluide ou solide, qui effectuent des mouvements alternatifs provoqués par le 'ressort', de petite ampleur, dans un espace très réduit et à très grande vitesse.

Perrault fait la distinction entre cet espace de mouvement et l'espace parcouru par le son. On est donc bien en présence de deux types de mouvement, l'un, alternatif, qui concerne les particules d'air autour de leur position de repos, et l'autre, mouvement 'apparent', qui concerne le déplacement du phénomène à vitesse constante (on dit 'célérité', de nos jours, pour éviter la confusion). Perrault utilise alors une comparaison qu'on retrouve chez son ami Huygens<sup>586</sup> :

[...] Ce petit espace, que je suppose dans le mouvement de chaque particule de l'air lorsqu'il se fait du bruit, est pareil à celui que parcourent de petites boules arrangées sur un plan en ligne droite lorsque, ayant poussé la première, on fait qu'elle remue la dernière en remuant toutes celles qui sont entre deux. Car pour faire que la dernière soit ainsi remuée par la première, le moindre espace que l'on se puisse imaginer suffit.

C'est sans doute la première fois que la théorie 'ondulatoire' de la propagation du son, alors affranchie de sa métaphore aquatique, est exprimée de façon aussi claire. Cependant pour Perrault, comme pour Boyle et Mariotte, l'air est constitué de particules qui font ressort, et il n'envisage pas le phénomène comme une succession de compressions et de dilatations. L'insistance des physiciens à décrire et à représenter la structure de l'air de façon corpusculaire constitue un obstacle à l'appréhension de l'élasticité et de la compressibilité de manière autonome et dans leur ensemble. Newton y parviendra peu après.

### **Huygens et les ondes**

Le *Traité de la lumière* est rédigé à la même époque que le *Traité du bruit* de Perrault, et on sait que les deux savants sont très proches. Huygens, dans sa démarche d'explication du mouvement ondulatoire de la lumière, prend l'exemple de la propagation du son, et la décrit d'une façon presque semblable à celle de Perrault<sup>587</sup> :

Nous savons que par le moyen de l'air, qui est un corps invisible et impalpable, le son s'étend tout à l'entour du lieu où il a été produit, par un mouvement qui passe successivement d'une partie de l'air à l'autre, et que l'extension de ce mouvement se faisant également vite de tous côtés, il se doit former comme des surfaces sphériques, qui s'élargissent toujours, et qui viennent

<sup>583</sup> Compte rendus hebdomadaires des séances de l'Académie Royale des Sciences, année 1678.

<sup>584</sup> Claude Perrault, *Essai de physique*, Paris, 1680, tome 2, 'du bruit'.

<sup>585</sup> *idem* p.18.

<sup>586</sup> *id.* p. 19. Huygens utilise la comparaison avec les boules frappées dans le *Traité de la lumière* qu'il écrit à la même époque. Voir plus loin. (C. Huygens, *Traité de la lumière*, in Oeuvres complètes, La Haye, Nijhoff, 1937 t. 19, p. 471 et suiv.)

<sup>587</sup> C. Huygens, *Traité de la lumière*, in Oeuvre complètes, La Haye, Nijhoff, 1937, t. 19, p. 463.

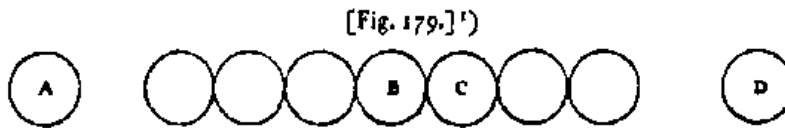
frapper notre oreille. [...] je les appelle ondes à la ressemblance de celles que l'on voit se former dans l'eau quand on y jette une pierre, qui représentent une telle extension successive en rond, quoique provenant d'une autre cause, et seulement sur une surface plane.

Huygens adopte la dénomination d'onde pour désigner ce type de mouvement qui passe successivement d'une partie de l'air à l'autre. Il se réclame volontiers de l'analogie avec les ronds dans l'eau, même si elle lui semble approximative. Sa description du mouvement des corps dans l'air se fait plus précise, et Huygens introduit la notion de compressibilité et d'élasticité de l'air<sup>588</sup>:

[...] on considère que l'air est de telle nature qu'il peut être comprimé et réduit à un espace beaucoup moindre qu'il n'occupe d'ordinaire; et qu'à mesure qu'il est comprimé, il fait effort à se remettre au large : car cela, joint à sa pénétrabilité qui lui demeure nonobstant sa compression, semble prouver qu'il est fait de petits corps qui nagent et qui sont agités fort vite dans la matière éthérée composée de parties bien plus petites. De sorte que la cause de l'extension des ondes du son, c'est l'effort que font ces petits corps qui s'entrechoquent à se remettre au large, lorsqu'ils sont un peu plus serrés dans le circuit de ces ondes qu'ailleurs.

Enfin Huygens reprend l'analogie avec les boules frappées, qui modélise correctement le mouvement de la perturbation, mouvement qui prend du temps et donc qui détermine la 'vitesse du son'<sup>589</sup> :

[...] Lorsqu'on prend un nombre de boules d'égale grosseur, faites de quelque matière fort dure, et qu'on les range en ligne droite, en sorte qu'elles se touchent, l'on trouve, en frappant avec une boule pareille contre la première de ces boules, que le mouvement passe comme dans un instant jusqu'à la dernière, qui se sépare de la rangée, sans qu'on s'aperçoive que les autres se soient remuées. Et même celle qui a frappé demeure immobile avec elles. Où l'on voit un passage de mouvement d'une extrême vitesse et qui est d'autant plus grande que la matière des boules est d'une plus grande dureté. Mais il est encore constant que ce progrès de mouvement n'est pas momentané, mais successif et qu'ainsi il y faut du temps.



On retrouve donc les deux principes développés par Perrault, le mouvement alternatif des corpuscules constituant l'air, et la propagation de ce mouvement jusqu'à l'oreille constituant lui même un déplacement, sans transport de matière, mais pourvu d'une vitesse propre et constante.

On dispose donc, à la fin du XVIIème siècle, d'une représentation cohérente de la propagation du son, par la description du mouvement de ressort des éléments constitutifs de l'air, favorisé par leur propriété d'élasticité et de mobilité, qui définissent la compressibilité de l'air.

<sup>588</sup> *Idem*, p. 471.

<sup>589</sup> *Ibidem*.

**ESSAIS  
DE PHYSIQUE,  
OU  
RECUEIL  
DE PLUSIEURS TRAITÉZ  
touchant les choses naturelles.**

**TOME II.**

*Par M. PERRAULT, de l'Académie Royale  
des Sciences, Docteur en Médecine de  
la Faculté de Paris.*



**A PARIS,**  
Chez JEAN BAPTISTE COIGNARD,  
Imprimeur ordinaire du Roy, rue S.  
Jacques, à la Bible d'or.

**M. DC. LXXX.**  
**AVEC PRIVILEGE DE SA MAJESTE.**

**DU BRUIT.**  
**PREMIERE PARTIE.**  
**OU IL EST EXPLIQUE**  
Quelle est l'Agitation de l'air qui fait  
le Bruit.

**CHAPITRE I.**

*Idée de l'Agitation de l'air qui fait le  
Bruit, exposée par six Phénomènes.*

**J'**APPELLE Bruit l'effet d'une agitation particulière que la rencontre de deux corps produit premièrement dans l'air voisin, & presque en même temps dans un plus éloigné, & jusques dans l'organe de l'ouïe.

L'explication de cette définition, qui est tout le sujet de ce Traité, consiste en trois choses, qui sont de sçavoir quelle est cette Agitation particulière de l'air; comment la rencontre de deux corps la produit; & comment elle est rendue sensible à l'animal par l'organe de l'ouïe.

L'Agitation de l'air qui est cause du Bruit est si particulière, que ses Phénomènes n'ont rien de ce qui est commun aux autres agitations de l'air: J'en ob-

A iij

Claude Perrault, Essai de Physique, tome 2, Du bruit, 1680.

L'Essai de Physique est une réponse à une commande passée par Louis XIV à l'Académie Royale des Sciences en 1675. Perrault n'achèvera pas son oeuvre qui ne comprend que quatre tomes, le premier sur la mécanique, le second sur l'acoustique, la musique et l'ouïe, le troisième sur le mouvement des animaux et le quatrième sur les sensations et diverses questions. Perrault est aidé dans sa démarche de physicien par Mariotte et Huygens, mais il est avant tout médecin, et c'est en anatomiste qu'il aborde l'explication des phénomènes naturels. La troisième partie du Traité du Bruit est consacrée à l'organe de l'ouïe, avec une réfutation du concept de l'air inné aristotélicien.

## Newton et les vibrations dans les milieux élastiques

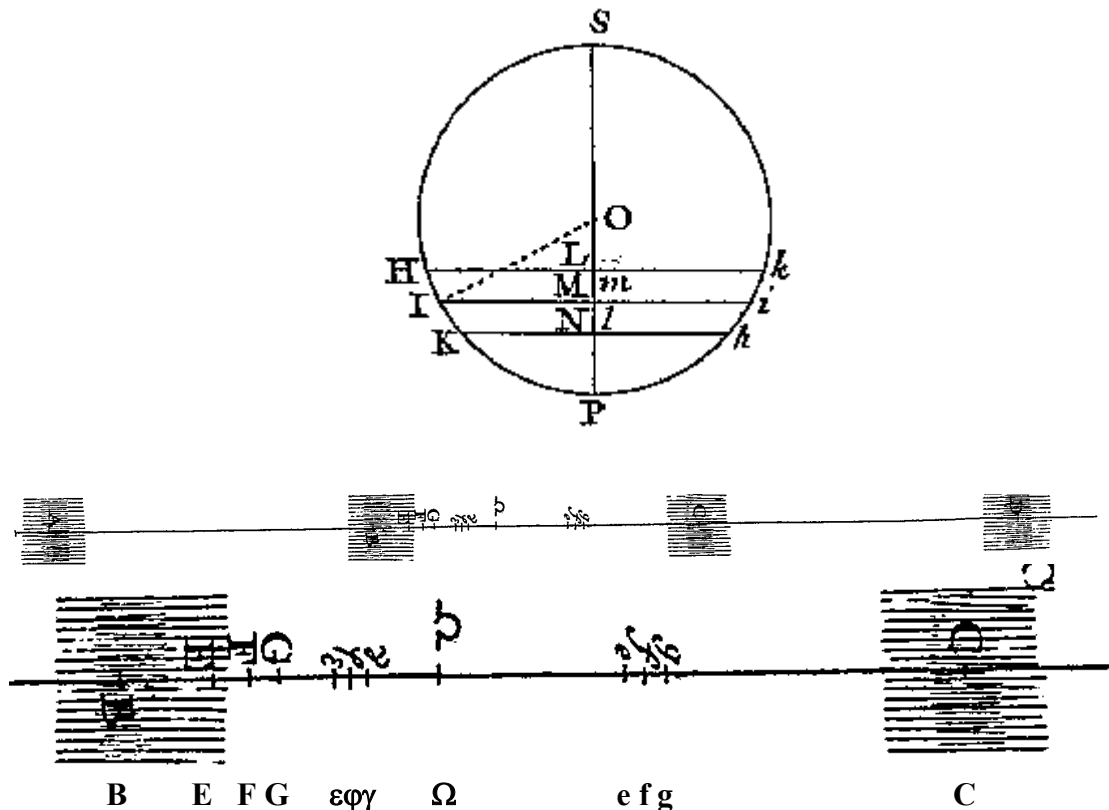
A l'inverse de nombre de ses prédécesseurs, Newton n'a pas de connaissances musicales. Soit qu'il n'ait pas eu cet enseignement classique, qui comprenait la musique, soit qu'il n'ait pas eu l'engouement pour cette discipline, mais il ne porte aucun intérêt pour cet art.

Newton aborde l'étude du son par une tout autre approche. Vers la fin du livre second (*Du mouvement des corps*), des *Principia*, son oeuvre majeure, il traite de la propagation des vibrations en général, dans les fluides et dans les milieux élastiques.

Comme Perrault, Newton envisage la propagation des mouvements vibratoires comme des déplacements alternatifs de 'parties' du milieu considéré. 'Tout corps vibrant propagera de toutes parts en ligne droite, dans un milieu élastique, le mouvement des pulsions.'<sup>590</sup> Puis il étudie le mouvement alternatif de l'eau dans un tube en forme de U, et assimile ce mouvement à celui d'un pendule. Enfin Newton analyse le mouvement des ondes formées à la surface d'un fluide, et cherche à en trouver la loi en systématisant la notion de pulsion<sup>591</sup> :

Des pulsions étant propagées dans un fluide, chacune des particules de ce fluide, qui vont et qui viennent par un mouvement réciproque très prompt, sont toujours accélérées et retardées suivant les lois des oscillations des pendules.

Dans une longue démonstration, Newton cherche à définir, lors de la propagation d'une onde à la surface de l'eau, la loi de variation de l'amplitude en fonction du temps. Pour cette démonstration, il a recours à deux figures. L'une est une droite ABCDE, espace sur lequel se propage l'onde, avec les points hauts figurés par des carrés hachurés. L'autre est un cercle représentant le temps, dont la circonférence est égale à la durée d'une vibration. Le mouvement d'un point sur le cercle correspond, sur le plan temporel, au mouvement spatial d'un point sur le segment BC et à son retour.



Newton considère les points en mouvement E, F, G quelconques. Ee, Ff, Gg sont « les espaces égaux très petits dans lesquels ces points vont et viennent à chaque vibration ». ε, φ, γ sont « les lieux quelconques

<sup>590</sup> Newton, *Principia*, trad. Mme Du Châtelet, liv. II, p 398)

<sup>591</sup> *Idem*, Prop. XLVII, p 403.



intermédiaires de ces mêmes points». Sachant que Ee est égal au diamètre du cercle PS, aux points  $\varepsilon$ ,  $\phi$ ,  $\gamma$  correspondent les points L, M, N, eux mêmes projections des points K, I, H sur le rayon OP, 'images' des instants de mise en mouvement des points E, F, G, par rapport à la vibration totale BC. Les points  $\varepsilon$ ,  $\phi$ ,  $\gamma$  vont donc se déplacer de façon analogue sur le diamètre PS, au moyen de leurs 'images' L, M, N, dans le même temps que la vibration s'effectue en décrivant le cercle d'un mouvement uniforme. Newton cherche à établir la loi de variation du mouvement de ces points. La démonstration est longue et complexe. La trigonométrie était alors une application géométrique dans l'étude des triangles, la notion de fonction sinusoïdale et, qui plus est, les fonctions du temps n'existaient pas encore et Newton, bien qu'inventeur du calcul infinitésimal ne disposait pas du calcul différentiel qu'on peut leur appliquer, d'où la nécessité d'utiliser une modélisation au moyen du mouvement de trois points très proches. L'exposé est aride, et D'Alembert, dans l'article 'Son' de l'Encyclopédie, n'hésite pas à avouer sa perplexité : 'Cet endroit des Principes de M. Newton, est peut-être le plus difficile et le plus obscur de tout l'ouvrage'.

Ce qui est remarquable ici, c'est d'abord la représentation de la durée d'une période par la circonférence d'un cercle symbolisant le temps. L'utilisation des points N, M, L sur le rayon OP ne sont rien d'autre que les cosinus des angles formés par les différents arcs PK, PI, PH. Enfin l'étude des variations dans le temps des positions des points pose les jalons de l'étude analytique des fonctions du temps. La représentation du temps de façon géométrique était presque inconcevable avant les *Principia*, seul Galilée l'avait esquissée dans les *Discorsi*, à propos de la chute des corps<sup>592</sup>.

Dans la proposition suivante, Newton établit que 'les vitesses des pulsions qui se propagent dans un milieu élastique sont en raison composée de la raison sous doublée de la force élastique directement, et de la raison sous doublée de la densité inversement ; en supposant la force élastique du fluide proportionnelle à sa condensation'<sup>593</sup>.

Ce qu'on peut traduire par  $c = \sqrt{p} / \sqrt{\rho}$ , avec c, la célérité, p la pression et  $\rho$  la masse spécifique.

La démonstration est complexe, mais elle est une application du principe fondamental de la dynamique. Newton conclut en disant : « cette proposition deviendra encore plus évidente par la construction de la proposition suivante ».

Dans cette nouvelle proposition Newton cherche à déterminer la vitesse des pulsions, connaissant la densité et la force élastique du milieu. Il prend pour cela l'exemple de l'air<sup>594</sup> :

Supposons que le milieu soit comprimé comme notre air par un poids qui incombe dessus ; et que A soit la hauteur du milieu homogène dont le poids est égal au poids incombant, et dont la densité soit la même que celle du milieu comprimé dans lequel les pulsions sont propagées. Qu'on suppose un pendule, dont la longueur entre le point de suspension et le centre d'oscillation soit A : et dans le temps que ce pendule emploiera à faire une oscillation entière composée de l'aller et du retour, la pulsion en avançant parcourra un espace égal à la circonférence du cercle dont le rayon est A.

Ce qui peut s'écrire :  $\lambda = 2\pi A$ , avec  $2\pi A$  représentant la circonférence du cercle de rayon A, et  $\lambda$  ce que Newton appellera plus loin 'largeur de la pulsion'. Si l'on considère ces grandeurs dans le temps d'une période T, c'est-à-dire 'dans le temps que le pendule emploiera à faire une oscillation entière', alors on peut écrire :  $\lambda / T = 2\pi A / T$ . Si A est le rayon du cercle dont la circonférence est proportionnelle au temps, pour une unité de temps de référence on peut dire que  $A = 1$ .

On a alors  $\lambda / T = 2\pi / T$ . Et cette grandeur,  $2\pi / T$  est la vitesse angulaire de l'oscillation rapportée à un cercle dont la circonférence est l'unité de temps. L'onde est caractérisée par l'espace mesurable entre deux phénomènes périodiques, que Newton appelle 'pulsions' et il en définit la grandeur caractéristique, la 'largeur de pulsion'. Il s'agit bien entendu de ce que nous nommons 'pulsation', couramment désignée par  $\omega$ , et utilisée dans l'étude des mouvements périodiques. Cette pulsation, de forme  $2\pi / T$  est caractérisée aujourd'hui par sa fréquence  $f = 1 / T$ , d'où  $\omega = 2\pi f$ , avec f qui est la fréquence de l'oscillation.

Dans la proposition L, Newton cherche à déterminer les distances entre les pulsions. En fait il cherche à déterminer la relation entre la 'largeur de pulsion', la vitesse de propagation de cette pulsion et le nombre de vibrations dans un temps donné. Ce qu'il énonce de cette façon<sup>595</sup> :

<sup>592</sup> Galilée, *Discorsi*, IIIème journée. Il semble qu'Oresme ait évoqué, dès le XIVème siècle, une représentation du mouvement en fonction du temps.

<sup>593</sup> Newton, *Principia*, trad. Mme Du Châtelet, Prop. XLVIII.

<sup>594</sup> *Idem*, Prop. XLIX, p.407.

<sup>595</sup> *Id.*, Prop. L, p.410.

Il faut trouver le nombre des vibrations qu'un corps excite par ses trémulations dans un temps donné. Et il faut diviser par ce nombre l'espace que la pulsion peut parcourir dans le même temps, et le quotient sera la largeur d'une pulsion.

Le 'nombre des vibrations qu'un corps excite par ses trémulations dans un temps donné', c'est bien entendu la fréquence. 'L'espace que la pulsion peut parcourir dans le même temps', c'est la vitesse, ou plutôt la célérité de l'onde. Et enfin 'la largeur d'une pulsion', c'est la longueur d'onde. On trouve donc la relation maintenant bien connue :

$\lambda = c / f$ , avec  $\lambda$ , la longueur d'onde,  $c$  la célérité de l'onde, et  $f$  sa fréquence.

Avec Newton on entre dans le siècle des mathématiciens. Newton est sûr de ses théories, elles sont cohérentes et constituent un ensemble solide. Les vibrations sonores sont représentées par une succession de compressions et de détentes de l'air, et cette conception est toute nouvelle. Elle avait bien été suggérée par Pardies (publié par Ango), puis développée par Huygens et sa théorie des fronts d'ondes. Mais seul Newton s'est attaqué aux calculs et à une conception vraiment dynamique des ondes. Cependant l'étude des sons ne constitue pas pour lui un sujet digne de plus d'intérêt, et il passe à côté d'une étude analytique approfondie des phénomènes périodiques, dont la vibration sonore est l'archétype.

### ***La propagation du son dans l'air condensé : Hauksbee, Brémond, Zanotti***

Hauksbee (1666-1713) est un savant anglais, élève de Hooke, qui s'intéresse à la physique de l'air ainsi qu'aux balbutiements de l'électricité. Membre de la Royal Society il publie plusieurs articles dans les *Philosophical Transactions*, de 1704 à 1715. Ces articles font l'objet d'une première publication en 1709 et sont traduits en italien en 1716. Le jeune François de Brémond, introduit comme 'adjoint' à l'Académie Royale des Sciences grâce à Dortous de Mairan, entreprend la traduction des expériences de Hauksbee qui paraîtra en 1754.

Hauksbee s'intéresse à la propagation du son dans l'air et fait quelques expériences avec un air raréfié et condensé. Cependant si ses textes constituent un rapport précis des observations et des résultats, ils ne présentent pas d'hypothèses. Brémond, dans sa traduction, développe largement le sujet et confronte les expériences de Hauksbee avec celles de Zanotti, philosophe et physicien de Bologne qu'il avait rencontré.

Les expériences de Hauksbee<sup>596</sup> sur le son portent sur trois thèmes : les différences d'intensité selon le niveau de compression de l'air, la propagation dans les liquides, et la nature ondulatoire de la propagation avec l'inévitable modélisation par les ondes à la surface de l'eau. Ce qui est remarquable, ce sont les développements très riches que Brémond rédige à l'occasion de sa traduction. Là où Hauksbee relate en quelques pages, et d'une façon un peu sèche, les conditions de ses expériences, le jeune savant entreprend d'interpréter, d'élaborer une théorie et de formuler avec pertinence des hypothèses sur la propagation des sons dans l'air. Brémond était, à l'Académie, le protégé de Mairan, et il n'a pas publié, faute de temps. Cet esprit brillant n'aura pas le temps de se faire connaître, il meurt en 1742 à l'âge de 29 ans.

La première expérience de Hauksbee, la plus importante, concerne l'accroissement de l'intensité sonore avec l'augmentation de la pression de l'air dans un récipient en cuivre renfermant le corps sonore, ici une cloche. Des témoins sont placés à distance, à la limite de perception lorsque l'air du récipient est à pression ambiante. On injecte une 'atmosphère' (Hauksbee prend des précautions de langage pour oser ce néologisme) dans le récipient, et on constate l'augmentation d'intensité. On réitère l'opération jusqu'à cinq atmosphères, mais le résultat n'est pas concluant, l'augmentation d'intensité perçue n'est pas proportionnelle à l'air injecté, et Hauksbee s'en explique en invoquant les imperfections du matériel et les fuites de la soupape. Devant tant d'imprécision, Brémond, dans son commentaire suggère l'emploi d'un baromètre.

VII. An Account of an Experiment made at a Meeting of the Royal Society at Gresham College, upon the Propagation of Sound in Condensed Air. Together with a Repetition of the same in the open Field, by Mr. F. Hauksbee.

A Bell being included in a Brass Recipient, and placed at one end of a Room, about 50 yards in length: At the other end of which stood some Gentlemen to observe the sound; which before any Air was injected, the Bell upon striking was heard at that distance, and without diligent attention. Upon the intrusion of one Atmosphere (begging leave to call it so) the Bell being shaken as before, the sound was very sensibly augmented;

Extrait des *Philosophical Transactions*, vol. 297 (mars 1705). Hauksbee relate l'expérience de propagation du son dans un air condensé.

<sup>596</sup> Hauksbee, *Expériences physico mécaniques*, trad. F. Brémond, Paris, 1754, t. II, p.307-382.

La seconde expérience, en plein air, abandonne la mesure d'intensité par la différence de perception, trop subjective, pour adopter la mesure de la distance de perception limite. A pression ambiante on entend la cloche à 15 toises, après injection d'une atmosphère on l'entend à 30 et, après une nouvelle injection, à 45 toises. Au-delà le son est d'intensité constante malgré l'augmentation de pression. Le procédé est apparemment plus sûr mais les résultats peu probants, alors on invoque le brouillard, la température, les cloches de l'église voisine.. Hauksbee procède ensuite à l'expérience de propagation dans un air raréfié et s'excuse à nouveau des mauvaises conditions matérielles. Hauksbee ne tire aucune conclusion de ses expériences, mais il semble qu'il veuille prouver une proportionnalité entre la pression et l'intensité ou plutôt la distance de perception. L'intérêt des expériences d'Hauksbee réside dans la mesure de distance de perception, qui constitue une méthode fiable à une époque où on est incapable d'évaluer l'intensité sonore. Le procédé est acceptable à condition, on le verra, d'en respecter les lois...

Hauksbee reproduit également l'expérience de Boyle sur la non-propagation du son dans le vide, et de façon plus efficace. Il enferme le dispositif sonore, une cloche, dans un premier récipient contenant de l'air. Ce récipient est lui-même enfermé dans un autre dans lequel on pratique le vide au moyen de la pompe. Il n'y a donc plus de risque de fuite directe entre les deux milieux et l'expérience valide la théorie de la non propagation des sons dans le vide.

Le savant anglais procède ensuite à d'autres expériences, notamment sur la propagation du son dans un tube et la propagation dans l'eau, thème qui sera développé peu après par l'abbé Nollet.

Dans ses conclusions, Hauksbee insiste surtout sur la corrélation entre densité de l'air (liée à la pression) et distance de perception sonore, qu'il détermine comme directement proportionnelle<sup>597</sup>, erreur que Brémont va relever dans son commentaire. Il ajoute à cette occasion un long développement sur une question souvent débattue, la 'musique des sphères', ou le son produit par le mouvement des astres. On sait que les Anciens pensaient que si on ne percevait pas cette harmonie, forcément douce et agréable, c'est en raison de sa permanence qui nous ferait oublier sa présence. Malgré la critique ironique d'Aristote, la légende était vivace et on a même vu un Kepler s'épancher sur cette question, suivi par quelques illuminés<sup>598</sup>. Mais Hauksbee est un rationaliste, il explique pourquoi cette musique ne peut pas être perçue : c'est en raison de la raréfaction de l'air dans les hautes couches de l'atmosphère, qui rend la propagation sonore presque nulle.

Hauksbee relate ses expériences, rédige quelques corollaires, mais n'élabore pas vraiment de théorie sur la propagation des sons. En revanche, son traducteur Brémont développe et interprète avec une certaine perspicacité les expériences du savant anglais. Il est parfois dommage qu'il ait été contraint de citer les théories parfois un peu obscures de Dortous de Mairan, son protecteur au sein de l'Académie des Sciences.

Brémont expose la démarche de Zanotti, qui avait pris connaissance des expériences d'Hauksbee par la traduction italienne de son traité<sup>599</sup>. Dans un long développement, il confronte les deux approches, en introduisant une notion délaissée par le savant anglais, 'l'élasticité des parties du milieu', qui constitue, selon Brémont, « une condition aussi essentielle pour la propagation des sons ». Le problème se pose alors de la relation entre ces deux grandeurs, la densité (liée à la pression) et l'élasticité. L'une est-elle la conséquence de l'autre ou bien concourent-elles ensemble au phénomène? Zanotti se livre à plusieurs expériences pour établir une relation entre densité et élasticité, en provoquant l'augmentation d'élasticité par l'échauffement d'un air confiné, ce qui correspondait aux connaissances du moment. Il vérifie également que le son ne change pas d'intensité dans un air chaud libre de s'échapper du récipient. Tout en relatant les expériences de Zanotti, Brémont montre, en invoquant la nature sphérique de la propagation, que l'atténuation est proportionnelle au carré de la distance, ce que Mersenne avait suggéré, mais que Hauksbee et Zanotti semblent ignorer. Pour Hauksbee il est normal que la perception du son augmente avec la distance en cas d'augmentation de la pression, car il suppose une influence plus grande de la pression sur la distance, et il attribue alors la contradiction des mesures à l'imperfection du matériel. Pour Zanotti l'intensité est proportionnelle soit au carré de la pression, soit à celui du degré d'élasticité, soit au produit de ces deux grandeurs. Pour ne pas être perturbé par l'atténuation liée à la distance, il procède autrement. La mesure d'intensité est réalisée par la mesure de durée d'extinction du son, méthode plus pratique que la mesure de distance, mais qui suppose une atténuation proportionnelle au temps ce qui est loin d'être démontré... Brémont, à la suite de Zanotti, reprend alors les mesures de Hauksbee, et en appliquant la loi de l'atténuation proportionnelle au carré de la distance, établit que « l'intensité du son à la

<sup>597</sup> Hauksbee, *Expériences physico mécaniques*, trad. F. Brémont, Paris, 1754, t. II, p. 341.

<sup>598</sup> Voir à ce sujet Platon, *Timée*, Cicéron, *La République*, VI, 13, Macrobie, *Commentaire du songe de Scipion*, II, 1, ainsi que la critique d'Aristote dans le *Traité du Ciel*, II, 9. Voir Kepler, *Harmonice mundi*, 1619.

<sup>599</sup> Zanotti, Francesco Maria, *De sono*, in 'De bononiensi scientiarum et artium Instituto atque Academia commentarii', t 1, Bologne, 1731, pp. 173 - 181.

même distance croît comme les carrés des nombres qui exprimeront les degrés de la densité de l'air dans le récipient »<sup>600</sup>. Cependant c'est ignorer l'influence de l'élasticité, qui suit la même loi de variation que la densité, selon Zanotti. Si on tient compte des mesures faites par Hauksbee, et si on admet l'influence conjointe de la densité et de l'élasticité, alors l'intensité sonore est proportionnelle au produit de la densité par le degré d'élasticité. Et comme l'élasticité croît avec la température, l'intensité du son devrait augmenter, ce que Zanotti va entreprendre de vérifier. Il procède alors à deux expériences. Tout d'abord Zanotti prend un récipient où l'on peut comprimer l'air au moyen d'une valve et dans lequel il place un dispositif sonore. Il plonge le récipient dans l'eau chaude et actionne le dispositif sonore. L'air comprimé acquiert un 'degré de ressort' supplémentaire sous l'action de la chaleur. Zanotti constate alors une augmentation de l'intensité sonore qu'il mesure, à l'aide d'un pendule, par la durée d'extinction du son, comparée à celle correspondant à un air à température ambiante. Comme le constate Brémond, l'augmentation d'intensité n'est donc pas due ici à l'accroissement de densité, constante dans ce cas, mais à l'augmentation du ressort consécutive à l'élévation de la température. Zanotti répète l'expérience à plusieurs reprises avec les mêmes constatations. Dans une seconde expérience, Zanotti reprend ce même récipient muni d'un dispositif sonore, mais avec des orifices permettant à l'air de s'échapper. Une fois échauffé, l'air conserve son 'degré de ressort', son élasticité, mais voit sa densité diminuer. Or on constate que l'intensité du son décroît avec l'augmentation de la température, ce qui montre la corrélation entre la force du son et sa densité. Zanotti peut alors énoncer la loi selon laquelle 'la force du son suit les produits des degrés de l'élasticité de l'air par ceux de sa densité'. Zanotti invoque alors les expériences d'Hauksbee comme vérification de ses thèses. Cependant, comme le remarque justement Brémond dans son commentaire, « l'élasticité de l'air peut être compensée par sa densité et réciproquement, ce qui s'opposerait à l'augmentation ou à la diminution des sons. ». Cette belle construction semble donc un peu compromise...

François de Brémond s'attarde sur l'analogie des ronds dans l'eau, mais à la suite de Perrault, il la réfute comme inadaptée à la propagation des sons. Plusieurs savants, de Florence, mais également de l'Académie Royale comme De la Hire, ou encore Newton, avaient traité cette question et bien insisté sur cette inadaptation. La question qui travaille Brémond est la superposition de plusieurs sons dans une perception unique, et Mairan lui suggère la présence, dans l'air, de « particules de différentes élasticités dont les vibrations sont analogues par leur durée à celles des différents tons du corps sonore ». L'idée, audacieuse, condamnait définitivement la propagation ondulatoire du son et Brémond conclut, peut-être pas vraiment convaincu, que « ces raisons suffisent pour faire abandonner l'idée de la progression des sons par un mouvement d'ondulation ».

Or le paradigme du rayonnement sonore n'est pas la seule dérive intellectuelle encore en circulation au Siècle des Lumières. On sait que Newton avait esquissé une théorie brumeuse et risquée sur les sept couleurs du prisme et les sept tons de la gamme<sup>601</sup>. Cette théorie est reprise par Dortous de Mairan. On retient surtout de ce savant qu'il fut le successeur de Fontenelle comme secrétaire de l'Académie Royale des Sciences, et à ce titre un membre influent. Il semble que Mairan n'ait pas bénéficié d'une grande estime auprès des savants et des encyclopédistes. Toutefois sa théorie sur l'analogie entre les sons et les couleurs figure en bonne place et a rencontré un certain succès. Elle a notamment été reprise à la même époque par le père jésuite Castel qui inventa, très inspiré par son prédécesseur Kircher, le 'clavecin pour les yeux', sorte d'instrument de musique qui associait les couleurs aux notes.

Mairan, après une première communication sur le sujet en 1719, écrit un article qui paraît dans les Mémoires de l'Académie Royale des Sciences en 1737, avec une présentation un peu critique de Fontenelle<sup>602</sup>. Dans cet article, inspiré de Newton, Mairan imagine que les vibrations émises par les corps sonores rencontrent des particules d'air adaptées à la fréquence des vibrations, et que la propagation est sélective. Il s'appuie sur l'analogie avec les couleurs transmises selon un mode différent en fonction du milieu de propagation<sup>603</sup>.

Je dis que l'air, en tant que véhicule du son, est un assemblage d'une infinité de particules de différente élasticité, dont les vibrations sont analogues par leurs durées à celles des différents tons du corps sonore, qu'entre toutes ces particules, il n'y a que celles de la même espèce, de même durée de vibration, et à l'unisson du corps sonore qui puissent retenir les vibrations semblables de ce corps et les transmettre jusqu'à l'oreille; que la plus petite masse d'air sensible contient plusieurs de ces particules de toute espèce, et que toutes leurs vibrations à la fois, ou les frémissements de la masse dans toutes ses parties ne peuvent produire que le son en général ou le bruit.

Mairan réfute, à la suite de nombreux savants, dont De la Hire, Perrault et Newton, l'analogie avec les ronds dans l'eau, puisque de nombreuses observations ont confirmé la vitesse variable des ondes selon le poids

<sup>600</sup> Hauksbee, *Expériences physico mécaniques*, trad. F. Brémond, Paris, 1754, t. II, p. 319 et suiv.

<sup>601</sup> I. Newton, *Optique*, livre II, partie I, obs. XIV.

<sup>602</sup> Histoire et Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, H 1720, p.11, H 1737, p.97-104, M 1737, p.1-58.

<sup>603</sup> Mairan, Discours sur la propagation du son dans les différents tons qui le modifient, in Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, 1737, p.3.

de la pierre et la composition des mouvements lors de percussion entre ondes de fréquence différente. Pour Mairan, le processus du son est le même que celui d'un ressort, donc ses vibrations sont 'isochrones à elles-mêmes' et indépendantes de la masse, alors que les ondes à la surface de l'eau sont fonction de la masse. Cependant sa théorie n'est pas toujours très claire, et Mairan affirme qu'il a observé, par expériences successives, que le son d'une cloche aiguë parvenait plus vite à l'oreille que le son d'une cloche plus grave<sup>604</sup>. Son hypothèse, déjà développée dans le *Traité de l'aurore boréale*, lu en séance en 1731, est que l'air est composé de corpuscules d'inégale grosseur, 'car en supposant toutes ces particules de même figure et de semblable matière, l'inégalité des vibrations entraîne, comme on voit, l'inégalité des grosseurs'<sup>605</sup>. L'idée de Mairan est de conserver les caractéristiques qualitatives du son, non au moyen des 'eidola' des atomistes, mais grâce à la dimension des particules caractéristique de leurs vibrations propres.

L'essentiel de la théorie de Mairan repose sur la problématique de la superposition de sons de fréquences différentes. C'est pourquoi, en se référant à la perception des couleurs, il imagine que l'air est composé de particules de dimensions différentes, propres à propager les vibrations sonores qui lui répondent. Mais comme le remarque justement Fontenelle dans son commentaire, « cependant il ne faut user des analogies qu'avec une certaine circonspection, et on ne doit pas croire que pour découvrir ce qui appartient à l'acoustique ou aux tons, on n'ait qu'à recopier ce qui a été découvert sur l'optique ou sur les couleurs. Le parallèle des couleurs et des tons est assez borné »<sup>606</sup>. En résumé la théorie de Mairan est une sorte de synthèse d'inspiration atomiste et kirchérienne, il réfute l'analogie des ondes à la surface de l'eau, et tente d'établir une modélisation du phénomène vibratoire compatible avec la nature supposée corpusculaire de l'air.

### ***L'air et le son dans l'Encyclopédie***

Cette partie est extraite d'une communication orale lors d'un colloque sur l'Air et l'Encyclopédie, à Paris en 2007<sup>607</sup>.

#### **Un air bien silencieux**

Lorsqu'on parcourt l'article 'Air' dans l'Encyclopédie, apparemment très complet si on se réfère à sa longueur, on s'attend à ce qu'il y soit fait allusion à la propagation des sons, au moins lorsqu'on traite de la propriété d'élasticité. L'attente est déçue, et la seule évocation du son se trouve dans l'énonciation du caractère de fluidité de l'air :

[...] Commençons par la fluidité. Cette propriété de l'air est constante par la facilité qu'ont les corps à le traverser, *par la propagation des sons*, des odeurs et émanations de toutes sortes qui s'échappent des corps; car ces effets désignent un corps dont les parties cèdent au plus léger effort, et en y cédant, se meuvent elles-mêmes avec beaucoup de facilité: or voilà précisément ce qui constitue le fluide.

Heureusement, l'auteur, M. Formey, renvoie à l'article 'Son', auquel renvoie également le court article suivant le principal, concernant l'air inné :

Air inné, est une substance aérienne extrêmement subtile, que les Anatomistes supposent être enfermée dans le labyrinthe de l'oreille interne, et qui sert selon eux à transmettre les sons au sensorium commune. *Voyez Labyrinthe, Son, Ouïe*.

Mais par les questions agitées dans ces derniers temps au sujet de l'existence de cet air inné, il commence à être fort vraisemblable que cet air n'existe pas réellement.

Nous n'en saurons pas plus, et donc nous suivrons le conseil avisé de nous rendre à l'article 'Son'<sup>608</sup>. Cet article traite abondamment du processus de génération des sons, ainsi que de la vitesse de propagation, sujet très en vogue chez les savants à cette époque. Mais l'air n'y est pas considéré à sa juste place dans le phénomène acoustique, si ce n'est pour dire qu'il est le milieu approprié à la propagation des sons, ce qu'avait déjà constaté Aristote...

Pour expliquer ce silence, on peut alors formuler l'hypothèse, compte tenu de l'état des connaissances, d'une simple ignorance du mécanisme de la propagation d'une perturbation dans un fluide et, d'une façon générale, de l'évolution d'une transformation physique dans le temps. Plutôt que de s'aventurer dans des conjectures hasardeuses, d'Alembert préfère un silence prudent, remettant à quelques années l'explication

<sup>604</sup> *idem.*, p.19.

<sup>605</sup> *id.* p.21.

<sup>606</sup> Fontenelle, *Sur la propagation du son*, in Histoire de l'Académie Royale des Sciences, 1737, p. 102.

<sup>607</sup> François Baskevitch, communication orale : Colloque : Sur un "Air" d'Encyclopédie - Groupe D'Alembert – CNRS, Ecole Normale Supérieure - 45, Rue d'Ulm - 75005 Paris - 3 et 4 Mai 2007.

<sup>608</sup> L'article intitulé 'Air inné' concerne l'anatomie de l'oreille et la physiologie.

mathématique de ces phénomènes variables alors en pleine gestation. La question des cordes vibrantes, et ses multiples applications notamment en acoustique, va bientôt agiter la communauté scientifique et d'Alembert y prendra une place prépondérante.

## La physique du son et quelques physiciens du XVIIIème siècle

Un thème est présent dans toutes les théories physiques du son, depuis l'Antiquité, c'est la différence supposée ou constatée de propagation du son selon la température de l'air, le jour et la nuit ou encore l'hiver et l'été. Brémond aborde ce problème selon deux pistes qu'il semble associer, la vitesse de propagation et l'intensité. Il confronte plusieurs observations, de Derham et de s'Gravesande, selon lesquelles la vitesse de propagation est constante, ce qui sera vérifié quelques années plus tard par Cassini. En revanche, les variations d'intensité sont peu observées, mais constamment affirmées, et Brémond se range à cet avis de la vitesse variable, partagé par s'Gravesande, allant jusqu'à proposer que « la force du son doit influencer sur sa vitesse puisque c'est une plus grande vitesse dans les molécules d'air mises en mouvement qui produit un ton plus fort ». C'est alors que Brémond s'intéresse à la propagation des sons dans les différentes couches de l'atmosphère. Il évacue rapidement la 'musique des sphères' mais s'attarde longuement sur les expériences pratiquées à des altitudes différentes. Ses conclusions sont mathématiquement justes mais contraires à l'expérience. En effet, d'après sa théorie, la conjugaison des lois d'atténuation proportionnelle à la fois au carré de la distance et au carré de la densité entraîne une intensité extrêmement faible pour des sons émis au sommet d'une montagne peu élevée. Or les expériences de nombreux explorateurs contredisent cette théorie.

Parallèlement à ces recherches, s'Gravesande, physicien hollandais, travaille à Leyde sur l'élasticité de l'air et tente de comprendre le phénomène de propagation d'une déformation, le mouvement ondulatoire de l'air, en s'inspirant de la théorie développée par Newton dans les *Principia*<sup>609</sup>. Ses observations seront reprises et largement commentées par son compatriote Musschenbroek dans son *Essai de physique*<sup>610</sup>. Musschenbroek, inspiré par Huygens, expose une modélisation du mouvement des parties d'air formant les ondes sonores. Une première partie d'air, contiguë avec le corps sonore subit un déplacement forcé qu'elle communique à la partie conjointe, inerte, ce qui la contraint à revenir en arrière, grâce à sa propriété d'élasticité. Le mouvement se communique de proche en proche jusqu'à l'oreille. Ce mouvement ondulatoire se propage de façon sphérique à partir du point d'émission. Musschenbroek ne traite pas le problème sous l'angle mathématique, son ouvrage ne s'adresse pas à des spécialistes, mais à un public éclairé. C'est pourquoi il n'énonce pas la loi d'atténuation comme l'avait fait Brémond. En revanche, il cite les nombreuses expériences de mesure de la vitesse du son, sujet qui passionne les expérimentateurs, d'autant plus que les savants, depuis Newton, s'obstinent à la calculer avec une différence d'environ 20% inférieure à la vitesse mesurée dans des conditions de plus en plus rigoureuses.

On peut encore citer l'abbé Nollet, qui reprend à son compte les théories de Mairan en les développant et en s'attardant sur le processus de l'audition, mais sans apporter grand-chose à la physique<sup>611</sup>.

## Conclusion

Elasticité, fluidité, compressibilité, vide et interstices entre particules, la nature physique de l'air est intimement liée à la représentation de la nature physique des sons. La publication de l'*Encyclopédie* est contemporaine de cette mutation, et elle participe largement à la construction de cette nouvelle science des sons, grâce à l'établissement d'un savoir solide sur les propriétés de l'air et à la définition de nouveaux concepts physiques comme la pression et l'élasticité.

Néanmoins le processus de propagation des sons dans l'air n'est pas maîtrisé par les Encyclopédistes, et le silence sur ce sujet s'explique par ces tâtonnements.

En effet, le mouvement vibratoire est maintenant bien dissocié du transport de matière, et on sait également que le son est la propagation d'une déformation. Mais on ne connaît pas encore les lois de ce nouveau type de mouvement. Les outils sont disponibles depuis peu, le calcul infinitésimal, la trigonométrie, la méthode graphique de mesure de variation d'un phénomène physique<sup>612</sup>, reste à élaborer une méthode mathématique pour appréhender la variabilité des phénomènes naturels en s'affranchissant une fois pour toutes de la géométrisation des trajectoires et de la représentation statique. On est près d'y parvenir, ce sera l'œuvre de quelques savants, d'Alembert, Euler, Daniel Bernoulli, puis Lagrange, qui vont à présent construire une nouvelle boîte à outils, les équations aux dérivées partielles. Ce travail collectif prend la forme d'une polémique courtoise, celle dite des

<sup>609</sup> s'Gravesande, *Elements de physique*, Leyde, 1720, trad. Joncourt, Paris, 1746, t. 2, livre IV, chap. 7, p. 51-74.

<sup>610</sup> Musschenbroek, *Essai de physique*, Leyden, Luchtmans, 1751, t. 2, p. 689-711.

<sup>611</sup> J.A. Nollet, *Leçons de physique expérimentale*, Paris, Guérin, 1745, t. 3, p. 473-487.

<sup>612</sup> On en Bray propose en 1734 une machine qui enregistre graphiquement les variations des paramètres météorologiques.

‘cordes vibrantes’, qui se déroule dans les Mémoires de l'Académie de Berlin, de 1750 à 1760. Encore quelques décennies, et on parvient à représenter les sons sous forme graphique. Le XIXème siècle voit la science physique des sons prendre son indépendance vis à vis de la théorie musicale, et s'affranchir définitivement de la scolastique. On l'appellera dorénavant l'Acoustique.

## 9 - Synthèse

Deux champs de la connaissance couvrent l'étude du son pendant toute l'époque de la science scolastique, il s'agit de la musique et de l'étude des sensations. L'objet de la musique est de construire une œuvre à partir de matériaux sonores qu'on organise afin de produire un certain effet, intelligible. Elle s'intéresse aux rapports entre les sons, mais peu à leur nature physique. L'étude des sensations comprend l'étude de l'ouïe, et la physique des sons fait partie de cette étude, pour certains de ses aspects.

Les trois caractéristiques du son, à savoir la hauteur, l'intensité et le timbre, ne sont pas alors des grandeurs mesurables. Elles s'évaluent de façon relative, sans précision ni méthode, et ne constituent pas un enjeu pour la compréhension de la nature des sons. Les propriétés sont énoncées, décrites et justifiées, davantage qu'expliquées, dans le cadre des catégories aristotéliennes. La science scolastique, établie principalement sur les textes d'Aristote et de ses commentateurs successifs, supporte mal les évolutions et les remises en question. Dans le cas de la propagation du son, le problème essentiel est l'existence et la nature du mouvement du son. En effet, ne trouvant pas sa place dans les catégories de *kinesis* aristotéliennes, le son est alors considéré comme un mouvement de qualité, instantané. La moindre sensibilité de l'ouïe sur la vue, invoquée pour justifier le retard de perception, apparaît alors comme une tentative de mystification. Les Scolastiques tardifs tels que Francisco Suarez vont alors chercher à concilier le dogme avec la réalité observée en attribuant au son la notion de 'qualité successive', permettant ainsi d'éliminer l'hypothèse d'un mouvement inacceptable à cause du caractère atomiste qu'il entraîne.

Les premières contestations de l'aristotélisme se manifestent à la fin de la Renaissance. Trois philosophes de cette époque construisent une nouvelle approche de la science de la nature fondée sur l'observation et sur l'expérimentation, il s'agit de Francis Bacon, de Marin Mersenne et de Galileo Galilei. Etablir cette nouvelle méthode constitue une remise en cause de l'approche scolastique fondée uniquement sur le commentaire des textes des Anciens. Combattre l'Aristotélisme n'est pas entreprise aisée, et chacun a son style qui correspond sans doute à son tempérament. Francis Bacon fonde sa réfutation sur la critique de la méthode. Sa démarche est rhétorique et basée sur la pleine connaissance des textes et de leur réfutation argumentée. Marin Mersenne est souple. Il propose, expérimente, expose ses résultats, mais ne combat pas. Mersenne écrit beaucoup et abondamment, il développe longuement les propositions dogmatique avant de les réfuter, mais semble toujours accepter l'autorité des Anciens. Mersenne polémique peu, c'est un rassembleur. Galilée est très différent. Son style est volontiers polémique et il se confronte fréquemment aux Scolastiques appuyés par l'Eglise.

Les textes qui abordent et approfondissent la physique des sons sont des exposés d'observations, parfois d'expériences, destinés à décrire et à classer les propriétés du son. Certaines hypothèses sont avancées, sur la propagation dans l'air, sur les réflexions dans l'écho et sur la production du son dans les corps sonores. Rapidement les savants établissent la nécessité de connaître la structure de la matière et surtout de l'air, pour comprendre la physique des sons. Le courant atomiste propose bien une hypothèse qui repose sur une approche de la matière cohérente, mais pas encore vérifiable par l'expérience. De nombreuses incompatibilités se présentent qui la rendent provisoirement inopérante, notamment au sujet de la propagation des sons.

A partir de la fin du premier tiers du XVII<sup>ème</sup> siècle, il semble qu'il y ait une pause dans l'élaboration d'hypothèses et de modèles descriptifs de la propagation des sons. Cette pause de la part de la communauté scientifique en cours de constitution est alors mise à profit par le courant des savants jésuites qui tentent une dernière bataille pour maintenir une science scolastique compatible avec le dogme de l'Eglise. La physique des sons devient pour eux une description des phénomènes fondée sur une analogie avec la propagation de la lumière. Cette période se termine vers 1660 lorsque la physique de l'air s'établit à partir des expériences sur le vide, et lorsqu'une modélisation faisant intervenir la notion d'ondes commence à émerger. Les savants jésuites vont alors prendre une part importante à ce mouvement, n'hésitant pas à revenir sur leurs théories devenues indéfendables. L'aristotélisme est alors agonisant dans de nombreux domaines de la physique, et notamment dans le domaine de la physique des sons.

La célèbre analogie des 'ronds dans l'eau', qui a accompagné toute l'histoire de l'acoustique physique trouve quelques détracteurs qui observent finement les ressemblances, et qui concluent à la non pertinence du modèle.

La fin du XVII<sup>ème</sup> siècle constitue une charnière entre des modélisations devenues obsolètes et l'approche physico-mathématique de l'acoustique. En effet, la publication presque simultanée, vers 1685, du *Traité du bruit* par Claude Perrault, et des *Principia* par Isaac Newton permet une nouvelle approche de la physique des sons. Dès lors, il est clair que le son est une perturbation du milieu qui progresse de façon



sphérique autour du corps sonore, en profitant de l'élasticité du milieu de propagation. Les réflexions sont diverses et peuvent dans certains cas produire des échos. On invente peu d'instruments acoustiques, parmi eux le cornet d'oreille et le porte-voix, ainsi que les procédés de communication par tubes, ou encore, en architecture, les voûtes à effets spéciaux, ou encore les vases résonants.

La grande difficulté qui s'oppose à l'étude approfondie du son, c'est sa fugacité, et Galilée esquisse un procédé d'enregistrement des vibrations sonores qui n'aura pas de suite dans l'immédiat.

Alors le siècle de l'observation se termine, et fait place au siècle de la mathématisation, avec l'introduction de la variable temporelle dans la physique, grâce à un nouvel outil mathématique, le calcul différentiel.

Après cette peinture des sons, tantôt figurative, parfois lumineuse, souvent évocatrice, bref plutôt impressionniste, on passe presque sans transition à une peinture beaucoup plus abstraite, expression d'une poésie magnifique mais un peu froide, belle comme sait l'être l'équation différentielle aux dérivées partielles affublée de nos jours de cet affreux et ridicule appellation de 'dalembertien', la représentation mathématique des ondes sonores.

Cette représentation s'envole avec d'Alembert, Bernoulli, Euler et Lagrange, coupée de la réalité, coupée de la connaissance perceptible, parce que trop complexe, trop symbolique, et sans doute trop parfaite. Alors l'acoustique devient pendant plus de cent ans une affaire de spécialistes, de mathématiciens, de professeurs. Au début du XXème siècle l'acoustique disparaît des programmes scolaires, bientôt remplacée par le baratin des marchands d'amplificateurs qui assurent, du moins le pensent-ils, la formation en acoustique des citoyens.

Mais comme l'homme avait besoin de comprendre et de représenter ce qu'il ne conçoit pas, on a inventé une nouvelle représentation des sons, la représentation graphique. Ses premiers balbutiements sont dus à l'invention de l'enregistreur graphique par On en Bray, en 1734, et par l'idée saugrenue de Thomas Young, en 1807, de marquer, sur une feuille noircie à la fumée, la trace de la vibration d'un diapason. Puis Scott de Martainville, en 1857, invente le phonautographe, enregistreur graphique de la variation dans le temps d'une vibration sonore. D'autres représentations eurent moins de succès, comme celles de Lissajous, ou encore celles qu'on aurait pu déduire des recherches d'Helmholtz, une représentation de la fréquence en fonction du temps, par exemple, qui fait les beaux jours du mp3, comme on dit. Mais on a préféré après plusieurs tentatives, la notion de signal, variation d'une intensité dans une durée, et c'est Graham Bell qui l'entreprend, en inventant un procédé électroacoustique d'amélioration du télégraphe multiplex, qui permet, incidemment, de transmettre la voix sur des lignes télégraphiques. Il ne restait plus qu'à inventer le premier répondeur téléphonique, c'est Edison qui s'en charge, on appellera bientôt cet appareil invendable un phonographe.

François BASKEVITCH

## **Les représentations de la propagation du son, d'Aristote à l'Encyclopédie**

Entre la théorie de la musique et l'étude de la perception, il y a peu d'espace, dans la science Scolastique, consacré à la physique des sons. La mécanique aristotélicienne ne prévoit pas le mouvement sans transport de matière et cette lacune constitue un blocage. A partir du début du XVII<sup>ème</sup> siècle, de nombreux savants traitent le sujet, parfois dans des ouvrages entiers, souvent en quelques lignes. Le phénomène est invisible et fugitif, alors on invente des représentations. Parmi elles, la célèbre métaphore des ronds dans l'eau rencontre un succès certain, mais également le flux de corpuscules ou les rayons sonores. La rédaction de l'Encyclopédie est contemporaine de la mathématisation de la propagation des ondes, avec la modélisation par les cordes vibrantes. A travers une Histoire de l'Acoustique Physique, on entreprend ici l'étude de ces représentations et des controverses qu'elles suscitent parmi les différents courants de la pensée scientifique, de l'Antiquité aux Lumières.

## **The Representations of Propagation of Sound, from Aristotle to the Encyclopédie**

Between musical theory and study of perception, there is no space, for Scholastic Science, devoted to sounds physics. Aristotelian mechanics does not conceive a movement without a transport of matter and this gap produces a block. From 17<sup>th</sup> century, many scientists deal with the subject, sometimes in entire books, often in a few lines. The phenomenon of sound is invisible and fleeting, so representations are created. Among them, the famous metaphor of rings in the water meets a real success, but also flows of corpuscles or sonorous rays. The writing of the 'Encyclopédie' is contemporary with the mathematisation of waves propagation, with the modeling by vibrating strings. Through an History of Physical Acoustics, here is undertaken the study of these representations and the controversies that they bring about among the different movements of the scientific thought, from Antiquity to Enlightenment.

## **Histoire des Sciences et des Techniques**

**Mots clé :** acoustique physique – sons – représentation – propagation du son – vibrations – ondulations – ondes – fréquence – écho – vitesse du son – ronds dans l'eau – rayons sonores – ouïe – gammes – intervalles – consonances – sciences arabes – atomisme – scolastique – jésuites – Antiquité – Lumières – Encyclopédie – air – pompe à vide – cordes vibrantes – cloches – monocorde – porte-voix – enregistrement – Aristote – Galilée – Francis Bacon – Mersenne – Biancani – Descartes – Beeckman – Gassendi – Kircher – Huygens – Perrault – Pardies – Newton – Hauksbee – Mairan.

**Key words :** physical acoustics – sounds – representation – propagation of sound – vibrations – waves – frequency – echo – speed of sound – rings in the water – sonorous rays – hearing – scale – intervals – consonance – Arabic science – atomism – scholastic science – Jesuits – Antiquity – Enlightenment – Encyclopedie – air – vacuum pump – vibrating strings – bells – monochord – speaking-trumpet – recording – Aristotle – Galilei – Francis Bacon – Mersenne – Biancani – Descartes – Beeckman – Gassendi – Kircher – Huygens – Perrault – Pardies – Newton – Hauksbee – Mairan

**Université de Nantes**  
**U.F.R. Lettres et Langues**